

LOS CAMINOS COINCIDENTES DE GENES Y LENGUAS

MICROLASERES

DESARROLLO DE LA TEORIA DE CONJUNTOS

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

MIRADOR COSMICO

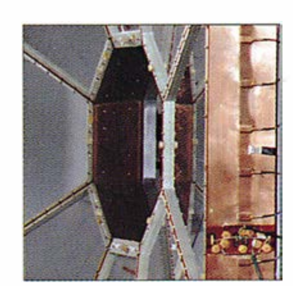
ENERO 1992
600 PTAS.


Enero de 1992 Número 184

4 

Genes, pueblos y lenguas
Luigi Luca Cavalli-Sforza

Las pruebas que apoyan la génesis africana de la humanidad son de tres tipos. Los árboles genealógicos basados en el análisis exhaustivo de datos genéticos se solapan con los diagramas de las divergencias lingüísticas producidas en las sucesivas ondas migratorias de las antiguas poblaciones; ambos, árboles y diagramas, se corroboran con los registros arqueológicos.

12 

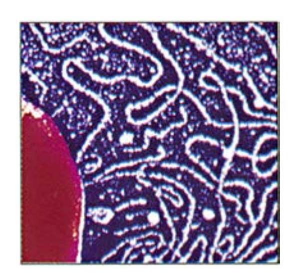
La ecuación de estado nuclear
Hans Gutbrod y Horst Stöcker

En ningún laboratorio puede repetirse la explosión en la que perece una estrella, lo que no obsta para conocer el comportamiento de la materia en esas condiciones extremas. Así como los estados del agua están ligados por una ecuación, hay otra que predice las fases de la materia al descomponerse en quarks y gluones.

22 

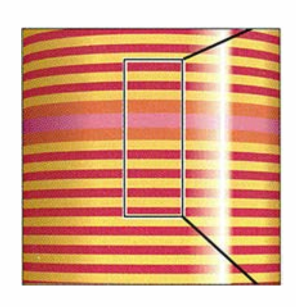
Proteína amiloidea y enfermedad de Alzheimer
Dennis J. Selkoe

En 1907, Alois Alzheimer observó que en el cerebro de ciertos dementes se acumulaban depósitos de “una sustancia peculiar”. Durante mucho tiempo se discutió si tales placas eran la causa o la consecuencia de la enfermedad. Prueba el autor que, en determinadas formas al menos, la proteína amiloidea es el factor desencadenante.

46 

Anticaos y adaptación
Stuart A. Kauffman

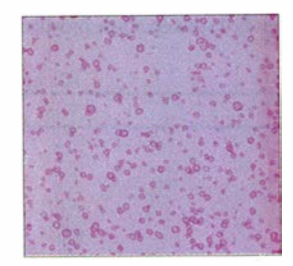
De ser correctas las conclusiones provisionales de este biofísico y sus colegas, la evolución de las especies es mucho más que selección natural darwiniana. El autor aduce que la noción matemática de anticaos, es decir, la súbita cristalización ordenada de sistemas complejos desordenados, desempeña en biología un rol crucial.

54 

Microláseres
Jack L. Jewell, James P. Harbison y Axel Scherer

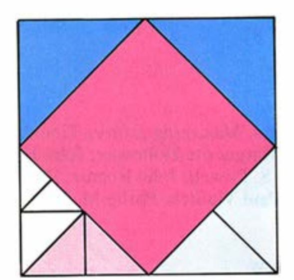
En comparación con los transistores de una pastilla de ordenador, los pequeños láseres rojos de los reproductores de discos compactos son unos artilugios muy grandes y burdos. Los investigadores están llenando la laguna que existe entre estos dos dispositivos gracias a la fabricación de láseres microscópicos, que prometen llegar a ser tan minúsculos como sus parientes electrónicos.

Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**

62 

El tratamiento de enfermedades mediante cultivos celulares
Howard Green

La sustitución de piel por injertos procedentes de células del propio paciente, cultivadas en el laboratorio, constituye el mayor alivio de las heridas producidas por quemaduras. La técnica de los cultivos celulares está sirviendo también para remediar ulceraciones.

70 

Alfred Tarski y su contribución a la teoría de conjuntos
Josep Pla Carrera

La teoría de conjuntos se desarrolló con gran ímpetu desde que Cantor y Dedekind observaron su importancia. Zermelo, Skolem y Fraenkel asentaron sus bases. Tarski profundizó en los problemas planteados y aportó resultados notables.

80 

TENDENCIAS EN ASTRONOMIA

Espejos para el cosmos
Corey S. Powell

Los espejos rígidos y gruesos de los telescopios de antaño dejan paso a superficies reflectoras de muchas facetas, ligeros panales de abeja y láminas de vidrio flexibles. Combinadas con tecnologías ópticas que compensan la distorsión atmosférica, los nuevos telescopios prometen la más clara y brillante visión de los cielos.

SECCIONES

3 **Hace...**

32 **Perfiles**

34 **Ciencia y sociedad**

¿Tablas?

44 **De cerca**

90 **Ciencia y empresa**

94 **Taller y laboratorio**

100 **Juegos matemáticos**



Perseo en busca de Andrómeda.

104 **Libros**

112 **Apuntes**

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Santiago Torres: *Genes, pueblos y lenguas*; Ramón Pascual: *La ecuación de estado nuclear*; Ana M. García: *Proteína amiloidea y enfermedad de Alzheimer*; Luis Bou: *Anticaos y adaptación* y *Juegos matemáticos*; Amando García: *Microláseres*; José Becerra: *El tratamiento de enfermedades mediante cultivos celulares*; Manuel Puigcerver: *Espejos para el cosmos*; J. Vilardell: *Hace...* y *Taller y laboratorio*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; Shigeko Suzuki: *De cerca*.

Ciencia y sociedad:

José A. Tagle, Luis Bou, Amando García, J. Enric Llebot, R. Muñoz y A. Ros, Joandomènec Ros y J. M. V. Martínez

Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver

Libros:

David Jou, Pere Molera, Luis Alonso, Joandomènec Ros y Francisco Gil

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
4-5	Photo Researchers, Inc.
6-9	Laurie Grace
10	L. Tommaso Cavalli-Sforza
12-13	Achim Zschau
14-18	Ian Worpole
19	NA35 Collaboration, CERN
23-24	Tomo Narashima
25	Dennis J. Selkoe
26-27	Tomo Narashima
30	George G. Glenner
46-47	Phototake, Inc.
48	Jason Küffer
49-50	Edward Bell
51-52	Jason Küffer
55	Axel Scherer
56	Michael Goodman
58-59	Michael Goodman
60	Axel Scherer
63	Stanley Rowin
64-67	Carol Donner
68	William Hickerson, BioSurface Technology, Inc (*izquierda*), Carolyn C. Compton, Shriners Burns Institute (*derecha*)
71	Cedida por American Mathematical Society
72-75	Josep Pla Carrera y Magda Màría
80-82	© 1991 Roger Ressmeyer/Starligtht
83	© 1991 Roger Ressmeyer/Starlight; California Association for Research in Astronomy (*derecha*)
84	Andrew Christie
85	© 1991 Roger Ressmeyer/Starlight
86	Andrew Christie
87	Tod R. Lauer, Kitt Peak National Observatory
88	© 1991 Roger Ressmeyer/Starlight (*izquierda*), European Southern Observatory (*derecha*)
89	© 1991 Roger Ressmeyer/Starlight (*arriba izquierda*), Robert D. McClure, Dominion Astrophysical Observatory (*arriba derecha*), Robert Q. Fugate, Phillips Laboratory (*abajo*)
94-99	Dominic Man-Kit Lam
100	M. Imani-PLS
101-102	Pour La Science



LA FOTOGRAFIA DE LA PORTADA muestra la elegante sencillez de la cúpula que aloja el telescopio Keck de Mauna Kea, en Hawai. Cuando se termine, el Keck será el mayor telescopio óptico del mundo (véase "Espejos para el cosmos", por Corey S. Powell, en este mismo número). El Keck forma parte de una nueva generación de telescopios que incorporarán espejos gigantes y electrónica avanzada para proporcionar imágenes notablemente nítidas y brillantes de los cielos. Los primeros resultados obtenidos con esos equipos indican la próxima llegada de una época de prosperidad astronómica.

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal Garfella
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
M.ª Cruz Iglesias Capón
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48 Telefax 419 47 82

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Alan Hall, *Executive Editor*; Michelle Press, *Managing Editor*; Timothy M. Beardsley; Elizabeth Corcoran; Deborah Erickson; Marguerite Holloway; John Horgan, *Senior Writer*; Philip Morrison, *Book Editor*; Corey S. Powell; John Rennie; Philip E. Ross; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
PUBLISHER John J. Moeling, Jr.
ADVERTISING DIRECTOR Robert F. Gregory
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª
08029 Barcelona (España)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48
Fax 419 47 82

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	6.600	12.000
Extranjero	7.300	13.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 600 pesetas
Extraordinario: 775 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

PUBLICIDAD

Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 409 70 45
Fax 409 70 46



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Tecfa. Línea Fotomecánica, Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

... *cincuenta años*

SCIENTIFIC AMERICAN: «Tal vez un saltador veterano pueda expresar qué se siente y qué pasa por la mente durante los breves segundos que transcurren entre el brinco desde el avión y ese fuerte golpe, que hace entrechocar los dientes, que produce la apertura del paracaídas al aplicar un frenazo repentino a una zambullida de cabeza en el aire; los novatos atraviesan ese breve intervalo en blanco. Aunque el atalaje de los paracaídas está diseñado para distribuir la sacudida entre las partes del cuerpo más aptas para absorberla, el castigo que se recibe al entrar en acción la campana de ocho metros y medio de diámetro es comparable a una reducción casi instantánea de la velocidad de marcha hasta unos 25 o 30 km por hora. En un automóvil, deceleración tan brusca podría perfectamente ser la antesala del salto del ángel a través del parabrisas; en el atalaje del paracaídas, se percibe la fugaz sensación de que el esqueleto se va a escapar del cuerpo saliéndose por los pies.»

«Según el doctor Ernst Gellhorn, profesor de fisiología en la Universidad de Illinois, la administración de dosis de oxígeno al 100 por ciento puede contrarrestar el deterioro de la vista provocado por la insulina. Ese deterioro, señala el profesor, es consecuencia de la estrecha relación entre el oxígeno y la concentración de azúcar en la sangre. A modo de ejemplo, la administración de insulina en una terapia de choque disminuye el exceso de azúcar en la sangre, priva al cerebro de parte del azúcar que consume y se producen trastornos visuales, entre ellos la pérdida de la capacidad para ver imágenes persistentes».

«El último, chiquito y matón, de los incorporados en nuestro ejército ha recibido toda suerte de apelativos cariñosos: jeep, peep, pulga, escarabajo, caballito de hierro, saltarín, matapanzer. Afectuosos todos, el de jeep se ha impuesto. Caía el sol abrasador del Mississippi en Camp Shelby mientras el teniente Patrick Summerour daba explicaciones a los reclutas, yo uno más, sobre las prestaciones del novato. Ante mí tenía un automóvil de 3,35 m de largo por 1,42 m de ancho y un metro de alto (o sea, la mitad de alto que un auto de turismo corriente y un metro más corto). Summerour nos indicó el gancho de remolque trasero. 'Con ésto arrastramos un cañón antitanque', nos dijo. 'Los paisanos suelen preguntar por qué no combatimos a los tanques con tanques. La respuesta es doble. Primero, un jeep cuesta 900 dólares y un tanque, 35.000. Segundo, estos vehículos, con sus cañones antitanque a remolque, se arremolinan en enjambres para pesadilla de los blindados enemigos.'»

... *cien años*

SCIENTIFIC AMERICAN: «Se cree que en la Tierra tiene lugar una inversión climática cada 10.500 años, provocada por la variación de la inclinación del eje de nuestro planeta. Hace unos 1500 años entramos en una época de temperaturas invernales más clementes y, si nada ocurre que lo impida, podemos esperar una suavización gradual de nuestro clima invernal a lo largo de los próximos 9000 años, tras los cuales se iniciará otra glaciación. ¿Cómo será nuestro país en el año 11.500? ¿Se asemejará a Egipto, con restos de grandes edificios asomando por la arena?»

«Los habitantes de las grandes ciudades se entregan con excesiva despreocupación a la comida, muchas veces mal cocinada y guardada demasiado tiempo; los pobres y los campesinos a menudo no consiguen comida fresca. El profesor Verneuil considera que debe hacerse algo para remediar semejante estado de cosas. Indica que Reclus, el geógrafo francés, ha demostrado que el cáncer es más frecuente entre las ramas de la raza humana en las que predominan hábitos carnívoros.»

«Hemos recibido algunas ingeniosas soluciones al problema de cómo colocar los diez dígitos de modo que sumen 100:

$0 + 1 + 3/2 + 9/6 + 4 + 5 + 87 = 100$
$0 + 1 + 34 + 5 + 6^2 + 7 + 8 + 9 = 100$
$1 + 3 + 4^2 + 50 + 6 + 7 + 8 + 9 = 100$

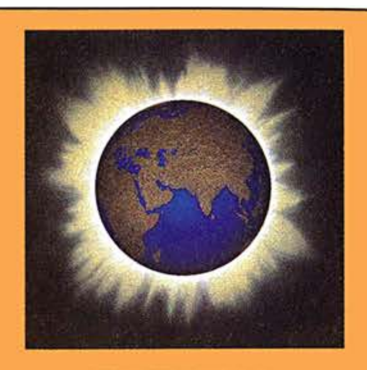
De C. F. Erhard

$5 + 10 + 36 + 47 = 98 + 2 = 100$

De W. Donaghy

Hay que decir, empero, que el uso de quebrados, o de exponentes para hacer multiplicaciones que impliquen prácticamente la repetición de un mismo número, es poco elegante.»

«En la descripción de una de sus últimas patentes, afirma Thomas A. Edison: 'He descubierto que si se consigue una elevación suficiente para salvar la curvatura de la superficie terrestre y reducir la absorción terrestre al mínimo, es posible enviar señales eléctricas entre puntos distantes mediante inducción y sin cables.'»



Genes, pueblos y lenguas

Los árboles genealógicos que relacionan pueblos y lenguas se superponen. Ambos remiten a corrientes migratorias. Las pruebas biológicas sitúan en Africa nuestro origen

Luigi Luca Cavalli-Sforza

Hace más de 40 años el laboratorio de Sir Ronald A. Fisher en la Universidad de Cambridge, donde yo había acudido para especializarme en genética bacteriana, estaba saturado de matemáticos teóricos. Se entiende, pues, que, en esa atmósfera, comenzara yo a darle vueltas a un proyecto tan ambicioso que rozaba la locura: reconstruir el origen de las poblaciones humanas y los caminos que éstas tomaron en su dispersión por el ancho mundo. El trabajo, pensé, podría abordarse midiendo el parentesco entre las poblaciones actuales y, conocido éste, crear el árbol genealógico de la humanidad.

La utopía está a punto de convertirse en realidad. El análisis exhaustivo de datos genéticos recogidos en los últimos 50 años y de otros nuevos obtenidos con técnicas de desarrollo reciente nos ha permitido cartografiar la distribución mundial de cientos de genes. A partir de ese mapa hemos deducido los linajes de las poblaciones de todo el mundo. Nuestro árbol concuerda con otro, más pequeño, basado en datos genéticos de índole muy diferente. Además, nuestra reconstrucción guarda sorprendentes paralelismos con una reciente clasificación de las lenguas. Genes, pueblos y lenguas se han diversificado, pues, a la par, a lo largo de una serie de movimientos migratorios que, según todos los indicios, comenzaron en Africa y se propagaron, a través de Asia, por Europa, el Nuevo Mundo y el Pacífico.

La noción de árbol genealógico es decisiva para situar tales episodios en una secuencia cronológica. A igualdad de otros factores, cuanto mayor sea el tiempo transcurrido desde la separación de dos poblaciones tanto mayor será la diferencia genética entre las mismas. Este tipo de análisis puede aplicarse después a casos más complejos, que impliquen a tres o más poblaciones. (La diferencia genética equivale en ese contexto a la distancia genética.)

Solemos hablar de grupos étnicos o razas para designar las poblaciones humanas, aunque el uso pervertido del segundo término aconseja su omisión. No es fácil definir las poblaciones de una manera rigurosa y útil a la vez, porque los seres humanos se agrupan de forma desconcertante, con solapamientos en ocasiones y, siempre, cambiando. Las lenguas, sin embargo, nos prestan una pequeña ayuda.

Durante largo trecho de su historia, la especie humana se ha organizado en tribus o grupos de personas ligadas por lazos estrechos. La afiliación tribal continúa siendo de gran importancia en las sociedades tradicionales. Y no es raro comprobar, además, una correspondencia exacta entre lengua y tribu. Las lenguas constituyen, por tanto, un punto de referencia para las tribus; las afiliaciones tribales, cuando se conocen, ayudan a esbozar un guión clasificador de las poblaciones.

En las sociedades metropolitanas la situación reviste mayor complejidad. Por eso hemos reducido los problemas prácticos centrando nuestros estudios en las poblaciones aborígenes, esto es, en las que ya ocupaban sus territorios actuales antes de que se produjeran las grandes oleadas migratorias que siguieron a los viajes de exploración en el Renacimiento. Las distancias entre esos grupos aborígenes no pueden calcularse por la mera presencia o ausencia de un simple carácter hereditario, o del gen que lo expresa, ya que todos los grupos portan prácticamente todos los genes humanos existentes. Lo que sí varía es la frecuencia con que los genes aparecen.

Tenemos un buen ejemplo de ello en el factor Rh, un antígeno sanguíneo humano que puede encontrarse en dos

Etnias y lenguas

CAUCASOIDES			AFRICANOS			ASIATICOS CONTINENTALES	
MEDITERRANEO	EUROPEO DEL NORTE	INDIO	BOSQUIMANO	MASAI	PIGMEO	CHINO	TIBETANO
FAMILIA DE LENGUAS INDOEUROPEAS			KHOISAN	NILOSAHARIANO	NIGERIANO-CONGOLEÑO	CHINO-TIBETANO	

formas, positivo y negativo, y sobre el que se ha acumulado abundante información. El carácter, que se hereda de una manera sencilla, se ha estudiado en miles de poblaciones por razones de salud pública. Los médicos deben identificar a las mujeres Rh negativas embarazadas que porten fetos Rh positivos, para administrarles un tratamiento inmunológico inmediatamente después del parto. El tratamiento impide que el cuerpo de la mujer fabrique anticuerpos que atenten contra el fruto de un segundo embarazo. Los genes Rh negativos, frecuentes en Europa, escasean en Africa y Asia occidental y son prácticamente inexistentes en Asia oriental, así como entre las poblaciones aborígenes de América y Australia.

Se puede estimar el grado de parentesco, por ejemplo, entre ingleses (16 por ciento de individuos Rh negativos) y vascos (25 por ciento) restando ambos porcentajes (nueve puntos). Entre ingleses y asiáticos orientales dicha diferencia es de 16 puntos, distancia mayor que implica, seguro, una separación muy anterior. No hay, pues, nada esotérico encerrado en la noción de distancia genética.

En realidad, para que las distancias suministren la mayor cantidad de información posible sobre las historias evolutivas solemos recurrir a fórmulas ligeramente más complicadas que la pura resta. Si dentro de una misma población se aíslan de forma absoluta unos grupos de otros, acabarán por diferenciarse, aun cuando no se produjeran mutaciones ni contáramos con la selección natural. El azar favorece el cambio de sus respectivas frecuencias génicas en un proceso de deriva.

A igualdad de condiciones, la distancia genética aumenta simple y regularmente con el tiempo. Cuanto mayor sea el tiempo que dos poblaciones llevan separadas, tanto mayor será su distancia genética. Podríamos así imaginar la distancia a modo de reloj que marcara los hitos de la historia evolutiva. Pero las leyes de la estadística nos demuestran que no hemos de esperar que un simple gen como el del Rh proporcione una cronología exacta. Es fundamental utilizar promedios de muchos genes en el cálculo de las distancias genéticas; lo ideal sería contrastar conclusiones con diferentes conjuntos de genes. Para nuestra ventura se conocen ya miles de genes, aunque sólo unos pocos se han analizado en muchas poblaciones.

Son muchos los principios en que apoyarse para reconstruir árboles de distancias genéticas. Sírvanos de ejemplo el árbol que publiqué hace 27 años, junto con Anthony W. F. Edwards, ahora en Cambridge, y que relacionaba 15 poblaciones. La genealogía basábase en distancias genéticas calculadas a partir de las informaciones genéticas de que en aquel entonces disponíamos, y de acuerdo con la fórmula del "camino genético más corto", propuesta por Edwards. Se trataba de construir el árbol que tuviera la mínima longitud de ramificación. Cuando el árbol se proyecta sobre un mapamundi, con las ramas descansando sobre los asentamientos actuales de las poblaciones, el resultado viene a coincidir con las reconstrucciones antropológicas de las migraciones de la antigüedad.

Pero carecemos de pruebas sólidas que reafirmen que el camino genético más corto sea la mejor forma de ajustar el árbol a los datos. Otros métodos dendrológicos podrían acertar más a la hora de relacionar la longitud de las ramas con el paso del tiempo y encontrar una fecha para la "raíz" del árbol. En los casos en que es posible, la raíz permite establecer una relación entre las poblaciones y un grupo distinto: por ejemplo, los chimpancés, que se dividieron de la línea que ha conducido al hombre hace unos 5 o 7 millones de años. Si admitimos una tasa constante de cambio evolutivo para todas las ramas, podemos equiparar sus longitudes con el tiempo transcurrido desde que se produce la divergencia. Pero también esos árboles enraizados pueden estar también sujetos a sesgos, si unas ramas han sufrido cambios evolutivos más rápidos que otras.

Las técnicas matemáticas de la genética de poblaciones reducen al mínimo los sesgos con predicciones correctas de las tasas evolutivas. El modelo evolutivo que utilizamos es el más simple. Predice que las ramas evolucionarán con idéntica celeridad, a condición de que la principal causa de cambio resida en la deriva y sea el mismo el tamaño de las poblaciones, como media. La primera condición la confirman observaciones de distinta fuente; la probabilidad de la segunda condición se refuerza con una juiciosa selección de las poblaciones. No es

LUIGI LUCA CAVALLI-SFORZA enseña genética en la Universidad de Stanford desde 1971. Nació en Génova hace setenta años y se doctoró en medicina por la Universidad de Pavía en 1944. Estudió genética bacteriana en Italia y, desde 1948 a 1950, en el laboratorio de Sir Ronald A. Fisher, en la Universidad de Cambridge. Se cambió a la genética de poblaciones humanas en 1952. Desde entonces ha estudiado los fenómenos de consanguinidad, deriva genética y forma de predecirla mediante observaciones demográficas, las relaciones recíprocas entre evolución biológica y cultural, el significado cultural de nombres y apellidos, y la reconstrucción de la evolución humana. Ha dirigido trabajos de campo entre los pigmeos africanos y ha aplicado técnicas moleculares al análisis de genes y la persistencia en el tiempo de material genético procedente de poblaciones aborígenes.

ARTICOS AMERICANOS OCEANICOS

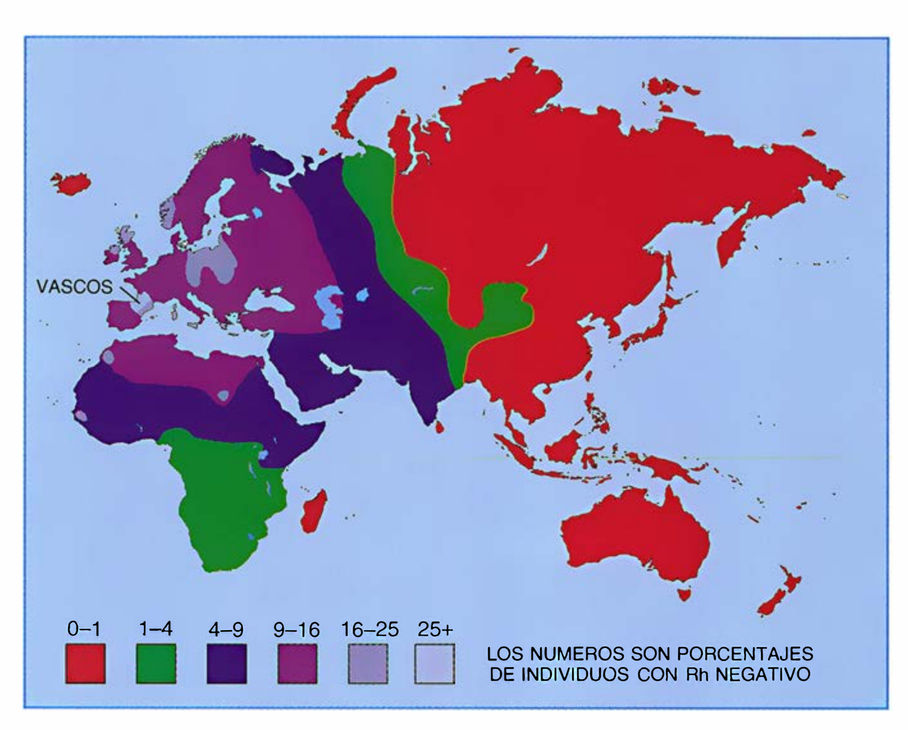
COREANO INUIT AZTECA YANOMANO POLINESIO MAORI MELANESIO AUSTRALIANO

COREANO ESQUIMO-ALEUTIANO AMERINDIO AUSTRONESIO INDO-OCEANICO AUSTRALIANO

raro que las tasas de evolución sean constantes si las poblaciones alcanzan ciertas dimensiones y han colonizado territorios que abarcan continentes durante un intervalo de tiempo que se prolonga hasta el asentamiento original.

Con mis colegas Paolo Menozzi y Alberto Piazza, de las universidades de Parma y Turín, respectivamente, diseñé un sistema analítico común para abordar la historia y geografía de los genes humanos. Dedicamos 12 años al estudio del cuerpo de datos genéticos que se había acumulado en los últimos 50 años: más de 100 caracteres hereditarios distintos procedentes de aproximadamente 3000 muestras, tomadas de 1800 poblaciones. La mayoría de las muestras incluían cientos o miles de individuos. Este conjunto de datos, nuestro conjunto clásico, deriva indirectamente de la proteínas expresadas por los genes.

Hemos trabajado, además, con un segundo conjunto enteramente nuevo: datos moleculares estudiados directamente a partir de las secuencias de ADN presentes en el núcleo celular. La mayoría de los datos moleculares que utilizamos se recogieron en un programa de investigación que duró siete años, en el que intervinieron mi laboratorio de la Universidad de Stanford y el equipo de Kenneth K. y Judith R. Kidd, del departamento de genética de la Universidad de Yale. Aunque estos datos son en muchos aspectos de superior calidad que los basados en los productos génicos, de momento sólo cubren una centésima parte de las poblaciones. No obstante, hasta donde se han comparado, los datos moleculares concuerdan muy bien con los clásicos.



1. MAPA GENETICO del factor Rh negativo. Se observa su alta frecuencia entre los vascos. Los datos sugieren que éstos han conservado los vestigios de una primitiva población europea que posteriormente se mezcló con otras procedentes de Asia.

Nuestros primeros resultados apoyan una conclusión que se extrae de los estudios de restos humanos físicos y culturales: el origen africano de nuestra especie. Hemos comprobado que las distancias genéticas entre africanos y no africanos es muy superior a la distancia que podamos inferir de cualquier otra comparación intercontinental. Y eso es lo que cabría esperar si la separación africana fuera la primera y más antigua en el árbol genalógico humano.

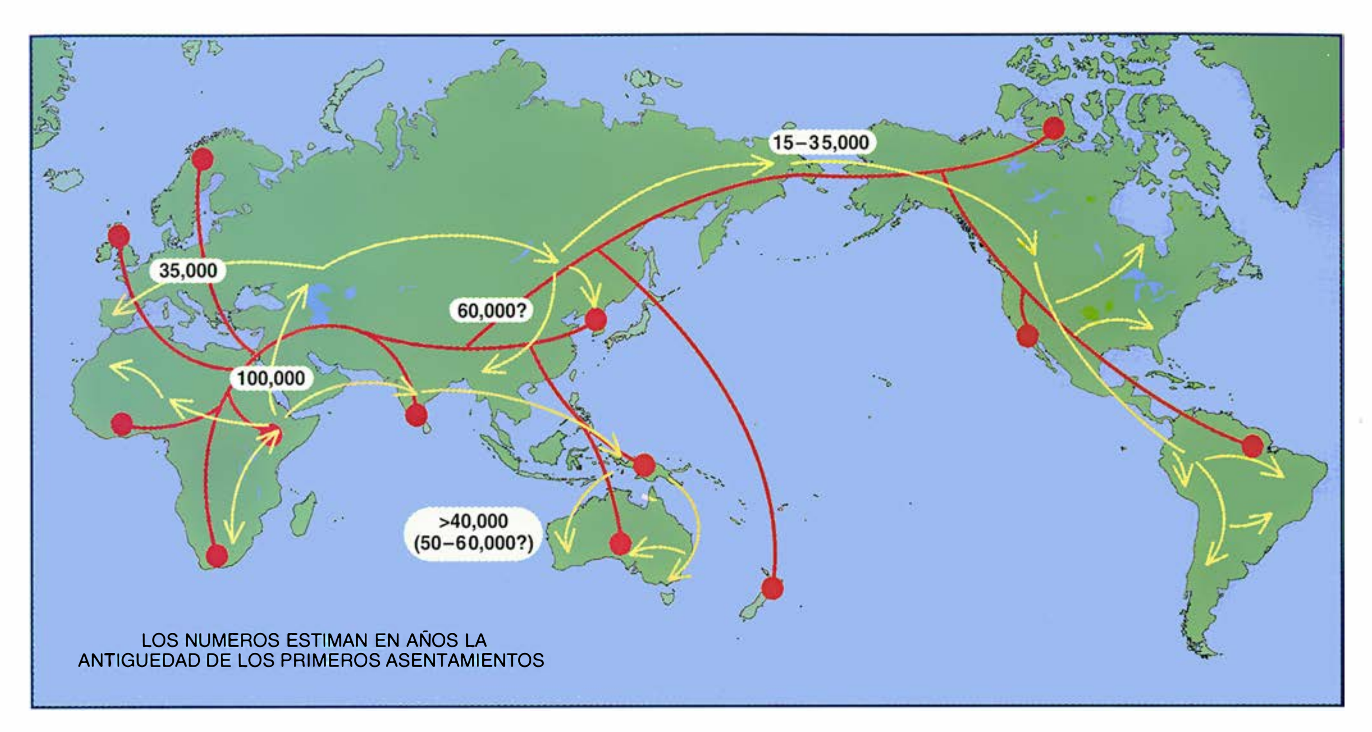
La distancia genética entre africanos y no africanos viene a doblar la distancia que media entre australianos y asiáticos; esta última separación dobla de lejos, a su vez, la distancia que existe entre europeos y asiáticos. Los tiempos de separación sugeridos por la paleoantropología guardan una relación muy similar: 100.000 años para la división entre africanos y asiáticos, unos 50.000 años para la separación entre asiáticos y australianos, y de 35.000 a 40.000 para la diversificación entre asiáticos y europeos. En estos casos, al menos, nuestras distancias se comportan como un reloj exacto.

Un reloj bastante distinto, aunque elegante, han creado quienes se han ocupado de investigar un tipo de datos genéticos de índole diferente de los nuestros. Nos llegaron sus descubrimientos más interesantes cuando nuestros análisis estaban a punto de cerrarse; pero, a pesar de la disparidad de origen, confirmaban nuestros hallazgos en todos los puntos esenciales. El estudio en cuestión se centra en los genes presentes en el ADN de las mitocondrias, orgánulos celulares que metabolizan energía. Nosotros, en Stanford, habíamos iniciado esa línea de trabajo, pero la metodología que desarrollaron Allan C. Wilson y sus colegas de la Universidad de California en Berkeley consiguió una resolución mayor. (Quiero aprovechar este momento para rendir tributo a las muchas contribuciones realizadas por Wilson a la evolución molecular. Murió de leucemia aguda en julio del año pasado, a la edad de 56 años.)

Los genes mitocondriales difieren de los genes del núcleo en varios aspectos fundamentales. Los genes nucleares se heredan, más o menos equitativamente, del padre y de la madre; los mitocondriales se transmiten a la descendencia a través, casi exclusivamente, de la madre. Este modo de herencia simple convierte a los genes mitocondriales en utillaje valioso para el cálculo de las distancias genéticas. Superan también a los genes nucleares en su tasa de mutación; esa cadencia más alta podría inducir a alterar en parte la determinación estadística de las distancias génicas, que no se calcularían de acuerdo con las frecuencias génicas sino basándose en las mutaciones de los propios genes.

El reloj mitocondrial se fundamenta en el número de mutaciones acumuladas, no en los cambios de las frecuencias génicas. Nuestra hipótesis pivotaba sobre la idea de una evolución, a ritmo constante, de las frecuencias génicas; Wilson y su grupo pedían lo mismo para los genes mitocondriales, pero centrándose en la tasa constante de mutación de éstos. Por la propia naturaleza de los datos, resulta más fácil ponerle raíz a un árbol mitocondrial que a otro nuclear. Basta cotejar el árbol que hemos creado con cualquier grupo externo —Wilson acudió a los chimpancés— cuya fecha o intervalo de fechas de separación sea conocida.

Con esas distancias, el grupo de Wilson construyó un árbol genealógico que revelaba más diferenciación en Africa que en cualquier otra parte. El descubrimiento indicaba que era en Africa donde el ADN humano mitocondrial había evolucionado durante un período de tiempo más largo, y



2. GENES Y PIEDRAS nos relatan una historia muy parecida. El primer árbol genético (*rojo*) se ha proyectado sobre un mapa, con sus extremos situados sobre los asentamientos actuales (*puntos rojos*). Trabajos más recientes apuntan dos rutas migratorias de Africa a Asia (*amarillo*). No tenemos pruebas de los pormenores de las rutas. Las estimaciones arqueológicas sobre los primeros asentamientos aparecen reflejadas en la ruta.

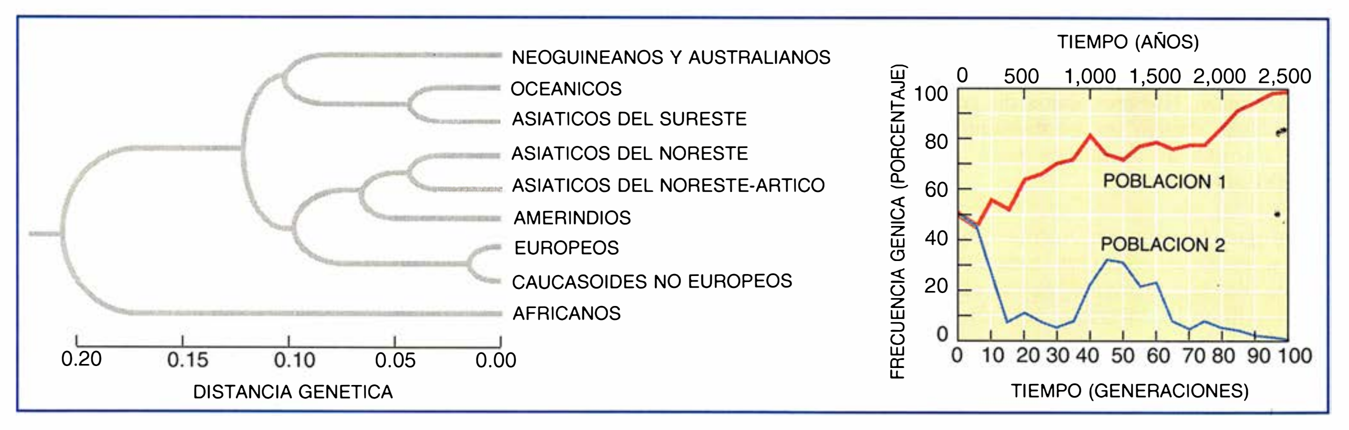
que podía seguirse su pista hasta una sola mujer africana. Además, los investigadores pudieron fechar los puntos de ramificación del árbol comparando el ADN de humanos con el de chimpancés, cuyos linajes se sabe se separaron hace unos cinco millones de años.

Calibrado el árbol, el grupo de Wilson se aprestó a deducir las fechas de las últimas ramificaciones. Y lo que es más importante, calculó que esa mujer africana vivió hace unos 150.000 o 200.000 años. Se confirmaban así nuestras conclusiones por otra vía, completamente independiente.

El equipo de Wilson ha acercado luego algo más el tiempo estimado, aunque su mujer africana todavía es anterior a la fecha que nosotros asignamos para la separación entre las poblaciones asiáticas y africanas. De hecho, tiene que ser más antigua, ya que las dos fechas se refieren a acontecimientos distintos, el nacimiento de una mujer determinada y la bifurcación de una población a la que ella pertenecía. Los medios de comunicación confundieron la cuestión, dándole amplia difusión a esa mujer, con el nombre de "Eva". Sin embargo, no tenemos pruebas de que haya habido nunca un instante en que sólo hubiese una mujer viva sobre la tierra. Muchas otras mujeres pudieron vivir al mismo tiempo; sencillamente, se extinguieron sus linajes mitocondriales.

Algunas de estas conclusiones siguen levantando controversia. Aunque los paleoantropólogos aceptan que el género *Homo* apareció en Africa hace unos 2,5 millones de años y que las pruebas fósiles del anatómicamente moderno *H. sapiens* se datan en sólo hace unos 100.000 años, en Africa o aledaños, no todos aceptan la teoría "africana". Hay quien aboga por una mayor antigüedad y por muchas poblaciones del Viejo Mundo a la vez.

No nos hemos limitado a situar en Africa los primeros humanos modernos. También hemos recogido pruebas de oleadas migratorias. Esas claves y pautas de migración arrojan bastante luz sobre el origen de las poblaciones



3. LA ACUMULACION DE CAMBIOS a lo largo del tiempo produce diferencias genéticas, como queda reflejado en este árbol genealógico de etnias (*izquierda*). La deriva, mecanismo de cambio, puede ser reproducida en el ordenador (*derecha*). Cuando una población se separa en dos mitades, sus frecuencias génicas son similares, pero con el tiempo y el azar pueden evolucionar en direcciones opuestas.

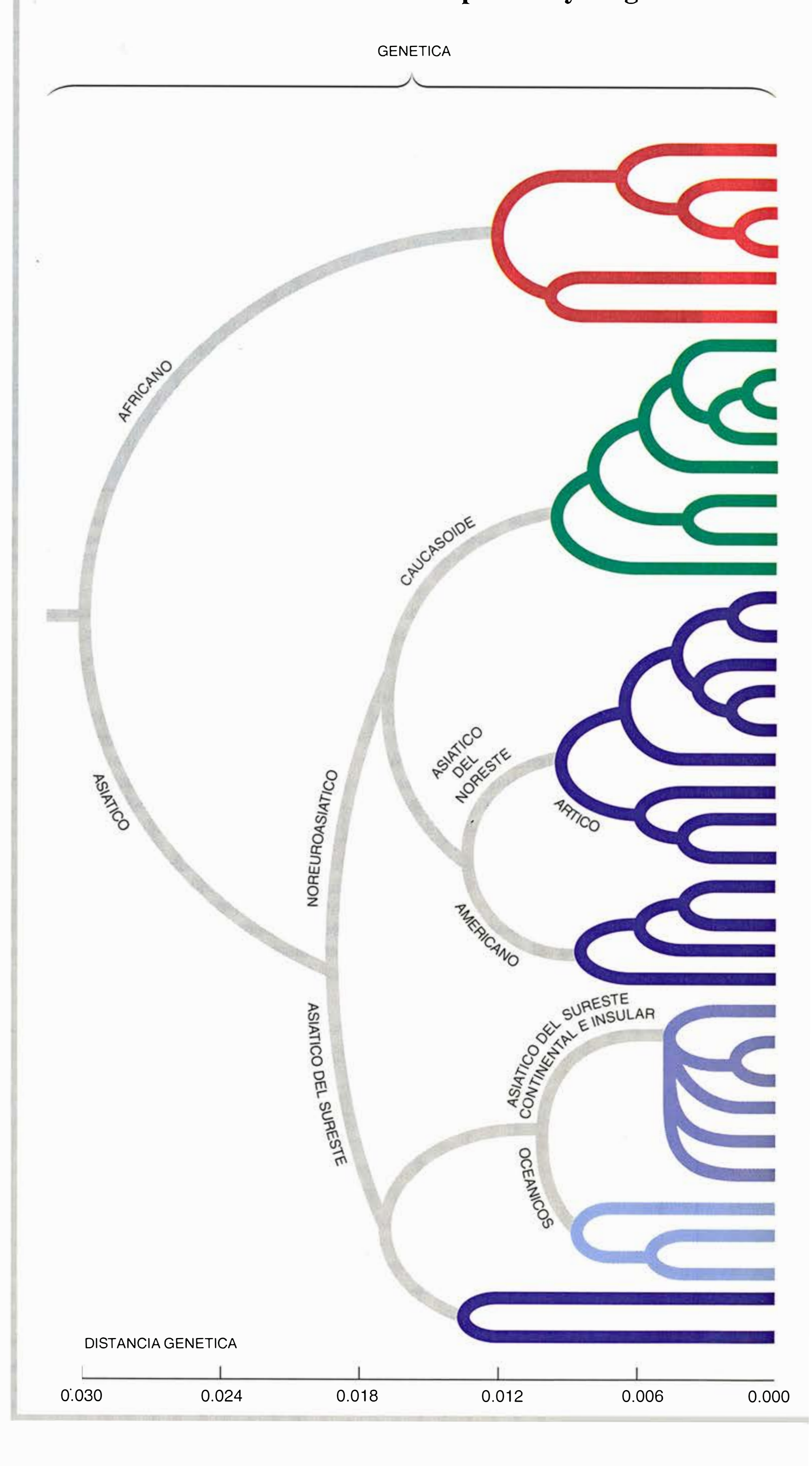
actuales. Un trabajo, por lo demás, que, cuando se le compare con los hallazgos de filólogos y arqueólogos, aumentará su valor y potencial informativo.

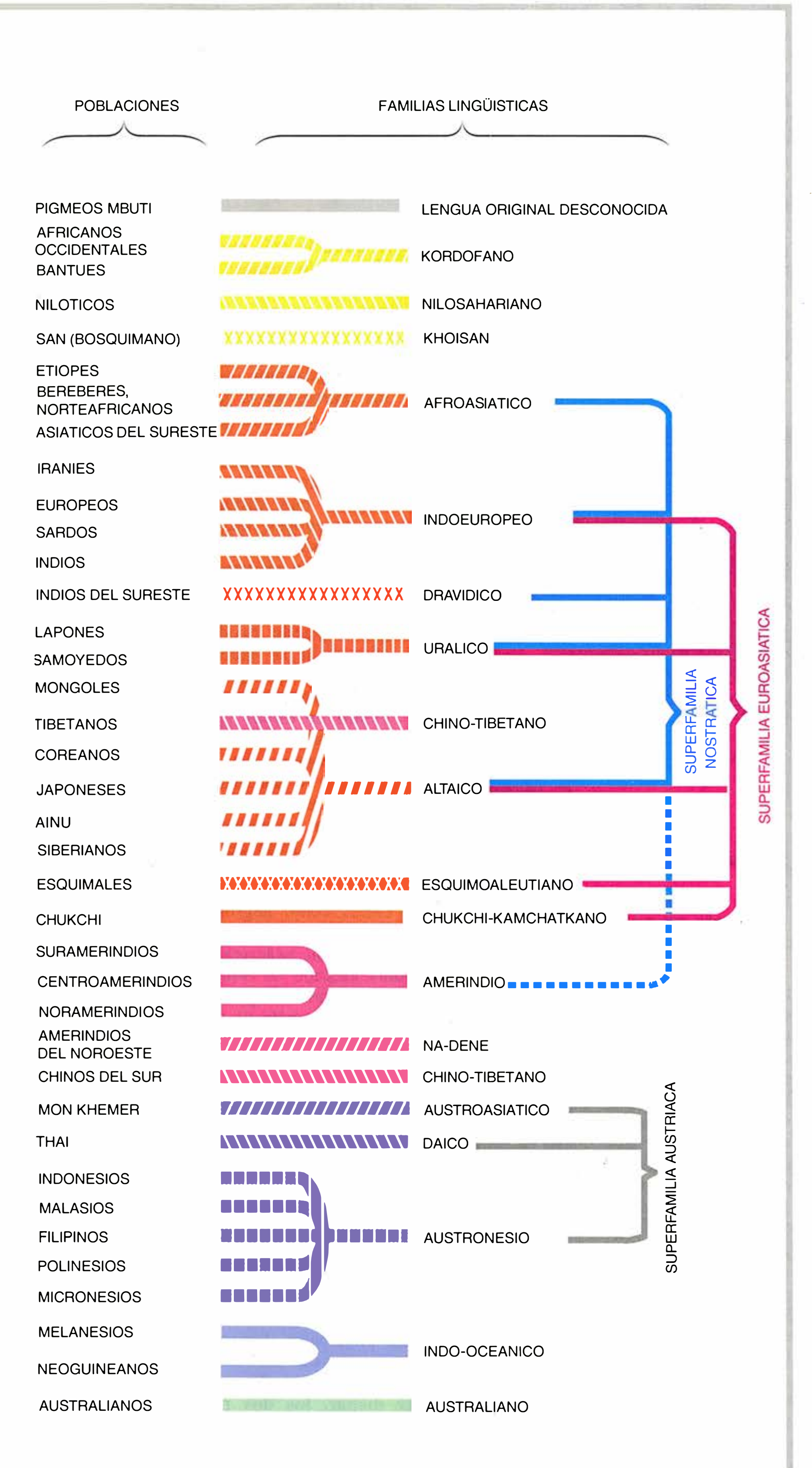
En general, los procesos migratorios reflejan cambios que obedecen a presiones y a nuevas posibilidades u oportunidades. Los humanos y sus homínidos antecesores registraron episodios de alta densidad poblacional y consiguiente expansión geográfica. Tales éxitos demográficos nacieron, en muchos casos, de cierto desarrollo cultural, que, en lo concerniente a la prehistoria, sólo podemos colegir de los restos arqueológicos. Esos testimonios —huesos e instrumentos líticos en su mayoría— corroboran la tesis africana del asentamiento original de los homínidos. Desde ese núcleo irradiaron hacia Asia vía el istmo de Suez y, posteriormente, pasaron de Asia a Europa. En esas regiones hubo enclaves homínidos hace quizás un millón de años.

El siguiente paso es más difícil de establecer, pues depende del momento en que imaginemos el desgajamiento de los humanos modernos del tronco homínido. En cualquier caso, está claro que ya había ocurrido cuando los humanos se dispersaron desde Asia hacia América, acontecimiento que ocurrió cuando el estrecho de Bering estaba seco y la suavidad del clima posibilitaba el avance por tierra. La colonización de Australia y las islas del Pacífico hubo de producirse también en fecha reciente, una vez dominada la navegación en mar abierto.

Por lo que sabemos, Australia la colonizaron emigrantes del sureste asiático hace unos 40.000, si no 10.000 o 20.000 años antes. Los arqueólogos andan divididos sobre la llegada a un continente americano. Con todo, los primeros signos convincentes de la presencia humana en Alaska se remontan a unos 15.000 años. Parece que hay dataciones anteriores en algunos sitios de América del Sur. Las estimaciones oscilan, pues, entre 15.000 y 35.000 años. Nuestros datos de genética nuclear abonan un asentamiento cuyos inicios se fecharían hará unos 30.000 años.

Europa, barrida en varias oleadas migratorias, conserva todavía vestigios de los primeros enclaves. En 1954 Arthur E. Mourant, del laboratorio de genética de poblaciones del Consejo de Investigaciones Médicas de Londres y adelantado de la geografía genética, ideaba una estratagema ingeniosa para resolver el rompecabezas. Según su hipótesis, los vascos (población del norte de España y del suroes-





te de Francia) son los habitantes más antiguos de Europa, y han conservado algo de su constitución genética primitiva, a pesar de su cruzamiento con sucesivos inmigrantes. La teoría se apoya en datos sobre el Rh negativo: los vascos tienen una frecuencia mayor de ese gen que cualquier otra población. Los trabajos con otros genes confirman la hipótesis, lo mismo que el estudio de las hondas diferencias lingüísticas entre el vascuence y la lengua de sus vecinos.

El análisis reciente de la variación génica que se observa de una punta a otra de Europa invitó a crear un modelo del posible curso seguido por la colonización europea. De acuerdo con el guión propuesto, los agricultores del Neolítico llevaron sus genes, cultura y lenguas indoeuropeas de Oriente Medio a Europa en un proceso de expansión lenta. Como los antepasados de los vascos vivieron en el otro extremo de la corriente migratoria, es probable que el grado de mezcla genética con los agricultores fuese mínima.

No podemos olvidar que sólo hallaremos patrones de asentamientos que reflejen emigraciones exitosas. También habría otras que fracasaron. En América, por tomar un ejemplo reciente, se sabe que los vikingos llevaron a cabo colonizaciones cortas, pero se desconoce su posible contribución al acervo génico del lugar.

Vayamos con nuestro tercer descubrimiento importante: la sorprendente correlación entre distribución de genes y distribución de lenguas. Llegamos, en efecto, a la conclusión de que, en ciertos casos, una lengua o familia de lenguas servía para identificar una población genética. Tenemos un ejemplo notable en las casi 400 lenguas de la familia bantú de Africa central y del sur, lenguas estrechamente emparentadas entre sí, que, además, se corresponden con las fronteras tribales y las afiliaciones genéticas entre tribus. Los fundamentos lingüísticos que sustentan este caso ya habían sido avanzados en los años cincuenta por Joseph H. Greenberg, de Stanford.

Greenberg sostenía, y lo acepta hoy la mayoría, que las lenguas bantúes descendían de una lengua común o de un grupo de dialectos emparentados que hablaban los antiguos agricultores del este de Nigeria y Camerún. Con la expansión de los campesinos hacia el centro y sur de Africa, hace al menos 3000 años, sus lenguas se diversificaron, pero no hasta el punto de velar su origen común. La explicación es aplicable a los genes de esas poblaciones; y así, el bantú —en su origen una categoría lingüística— se emplea ahora para designar un conjunto de

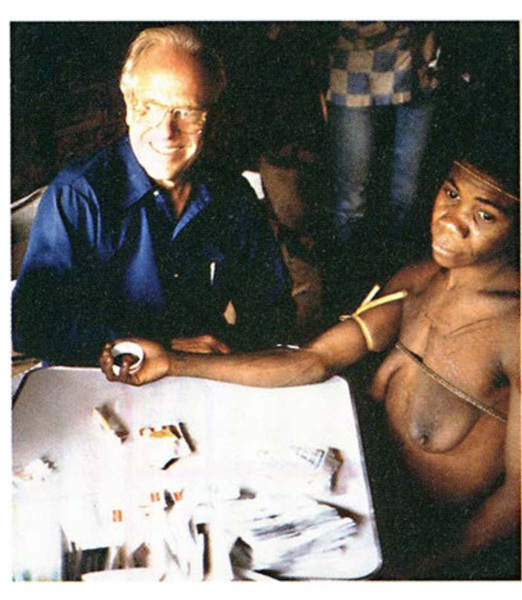
poblaciones que comparten una base lingüística y genética.

En 1988 publicamos un árbol filogenético de 42 poblaciones con sus parentescos lingüísticos respectivos. El árbol demuestra que el agrupamiento genético de las poblaciones se superpone sin rechinar al agrupamiento por lenguas. Con muy pocas excepciones, las familias lingüísticas parecen tener un origen bastante reciente en nuestro árbol genético. Añádase a ello la labor de dos grupos de lingüistas, que han creado categorías lingüísticas superiores ("superfamilias") con unos resultados paralelos a los obtenidos en el rastreo genético, de índole obviamente distinta. Por no mencionar la excitación que nos producía haber confirmado una conjetura de Charles Darwin, quien en el capítulo 14 de su libro *Sobre el origen de las especies mediante selección natural* señalaba que, si se conociese el árbol de la evolución genética, se podría predecir el de la evolución lingüística.

¿Por qué van de la mano la evolución genética y la lingüística? No se vea detrás ningún determinismo genético; la respuesta está en la historia: los genes no controlan el lenguaje, sino que son las circunstancias del nacimiento las que determinan la lengua con la que uno se las va a haber. Las diferencias lingüísticas podrían levantar o reforzar barreras genéticas entre las poblaciones, pero no es probable que sean el motor de la correlación. La evolución humana está plagada de fragmentaciones de las poblaciones en grupos, algunos de los cuales se asientan en otras partes. Cada fragmento desarrolla patrones lingüísticos y genéticos que llevan la huella de un punto de ramificación común. Por tanto, alguna correlación es inevitable.

Se puede objetar que las separaciones totales, como las que se establecen cuando un grupo disidente emigra a un nuevo continente, deben ser raras. Pero no se necesitan océanos ni cordilleras para dividir las poblaciones: basta con la distancia, como demuestran los estudios genéticos en muchas especies. Como los intercambios demográficos suelen ser más habituales en las distancias cortas, uno espera y encuentra un mayor grado de disparidad genética conforme se dilata la lejanía entre dos subgrupos. Lo mismo ocurre con las lenguas. Sin barreras especiales, las variaciones lingüísticas y genéticas tienden a ser continuas; la discontinuidad aparecerá (en la genética y en la lengua) si se levanta algún obstáculo contra el flujo libre de personas o poblaciones.

Nuestra regla de la correspondencia entre genes y lenguas presenta dos tipos de excepciones: cuando se produce sustitución de lengua y cuando se da sustitución de genes. El primer caso ocurre cuando la gente abandona su lengua ancestral por otra, la de los inmigrantes, conquistadores o élite cultural. No es fenómeno habitual y su probabilidad es menor si la lengua nueva procede de una familia diferente. El vascuence es un caso extremo de reliquia lingüística que ha logrado sobrevivir a miles de años de continuos cambios en las regiones vecinas.



4. MUESTRA GENETICA extraída de un pigmeo africano de la tribu de Aka, que aparece con el autor del artículo.

La sustitución de genes, normalmente parcial, acontece con la mezcla de dos poblaciones. La mezcla puede ser gradual y afectar entonces a las frecuencias relativas de todos los genes en la misma proporción. Este gradualismo es nota discriminante entre genes y lenguas, que pueden o no ser sustituidas. La lengua conserva su integridad ancestral aun cuando incorpore muchas palabras de otra familia o subfamilia lingüística. Los lingüistas coinciden, por ejemplo, en que el inglés sigue siendo un miembro de la subfamilia germánica a pesar de las aportaciones del francés, el griego y el latín. Lo que importa es que la estructura y el vocabulario básico conserven las características de la familia.

Esta diferencia significa que, cuando una minoría conquista a una mayoría y le impone su lengua, la sustitución del idioma es casi absoluta, en tanto que la sustitución génica es proporcional a la razón demográfica. Los húngaros, por ejemplo, hablan una lengua originaria de los Urales (que dividen Europa y Asia) impuesta por los conquistadores magiares de la Edad Media, pero presentan un patrón genético europeo. No es trabajo fácil detectar restos de genes magiares en la población moderna.

La sustitución génica a gran escala es quizá la más rara. Pero hay un ejemplo, por lo menos: los lapones, o saame, de Escandinavia septentrional. Su lengua pertenece a la familia urálica, pero su patrón genético sugiere una mezcla entre mongoloides de Siberia y escandinavos, responsables estos últimos de la mayoría de sus genes. La mezcla genética es evidente también en el cabello y la piel de los lapones, que varían de muy claro a oscuro. Una situación no muy distinta se presenta en los etíopes, una mezcla genética de africanos y caucásicos de Arabia, con un predominio de los primeros.

Incluso un modesto goteo de genes puede producir grandes efectos si se muestra pertinaz. Ejemplo arquetípico lo tenemos en los afroamericanos, un 30 por ciento de cuyos genes actuales, como media, derivan de antepasados europeos. Esta es la mezcla esperada si del total de las uniones de negros, desde que se instituyó la esclavitud en América, el 5 por ciento de todas ellas se hubieran realizado con europeos, y sus hijos hubiesen sido clasificados como negros. Otros 1000 años con un flujo genético similar acabarían prácticamente con el genoma africano de origen.

Es sorprendente quizá que se conserve ese alto grado de correlación entre lenguas y genes, a pesar de la distorsión provocada por las sustituciones génicas y lingüísticas. En parte eso puede ser reflejo de nuestra concentración en las poblaciones aborígenes. En cualquier caso, otros análisis confirman la existencia de esta correlación microgeográfica, a veces de forma espectacular. Quizás el ejemplo más notable lo represente la fuerte coincidencia entre nuestros análisis de patrones genéticos en los nativos americanos y la reciente clasificación de Greenberg de lenguas del Nuevo Mundo entre familias principales. Aunque los estudios se realizaron con metodologías diferentes, y manejaron datos de contenido muy dispar, los dos prestan sólido apoyo a la existencia de un grupo de migraciones discretas hacia ambos hemisferios americanos.

La explicación última de esta correlación entre genes y cultura debe buscarse en los dos mecanismos de transmisión: horizontal y vertical. Los genes, que se transmiten siempre de padres a hijos, describen una ruta vertical a través de las generaciones. La cultura también puede transmitirse verticalmente de generación en generación, pero a diferencia de los genes admite una transmisión horizontal, entre individuos no emparentados. La moda de temporada, por ejemplo, se presenta en París y se transmite al mundo entero (aunque ahora parece que Italia toma la delantera). En el mundo moderno la transmisión horizontal cobra cada vez mayor relieve. Pero las sociedades tradicionales se distinguen precisamente por el apego a su cultura —y normalmente su lengua— de generación en generación. Su forma predominantemente vertical de transmisión cultural las hace más conservadoras.

Las sustituciones de genes y lenguas son excepciones engorrosas a nuestra regla. Cada excepción opera de acuerdo con sus propias normas, y así se explica en buena medida la evolución de las poblaciones y lenguas y, por tanto, el desarrollo de la cultura humana. Nuestro trabajo debe completarse con la investigación de tales sustituciones. Los antropólogos deben acostumbrarse a manejar esas herramientas y no dejar escapar una información que se pierde por días. Pruebas de un valor incalculable se nos escapan de las manos cuando poblaciones aborígenes diluyen su identidad. El creciente interés por el Proyecto Genoma Humano podría estimular la búsqueda acumulativa de pruebas de diversidad genética humana antes de que se esfume.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CULTURAL TRANSMISSION AND EVOLUTION: A QUANTITATIVE APPROACH. L. L. Cavalli-Sforza y Marc W. Feldman. Princeton University Press, 1981.

RECONSTRUCTION OF HUMAN EVOLUTION: BRINGING TOGETHER GENETIC, ARCHAEOLOGICAL AND LINGUISTIC DATA. L. Cavalli-Sforza, A. Piazza, P. Menozzi y J. L. Mountain en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 85, n.º 16, págs. 6002-6006; agosto de 1988.

DRIFT, ADMIXTURE AND SELECTION IN HUMAN EVOLUTION: A STUDY WITH DNA POLYMORPHISMS. A. M. Bowcock, J. R. Kidd, J. L. Mountain, J. M. Hebert, L. Carotenuto, K. K. Kidd y L. L. Cavalli-Sforza en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 88, n.º 3, págs. 839-843; 1 de febrero de 1991.

HISTORY AND GEOGRAPHY OF HUMAN GENES. L. L. Cavalli-Sforza, P. Menozzi y A. Piazza (en prensa).

La ecuación de estado nuclear

Describiendo cómo se comporta la materia nuclear a distintas temperaturas y presiones, esta ecuación deja entrever las nuevas fases de la materia y las condiciones en el interior de una supernova o durante la gran explosión

Hans Gutbrod y Horst Stöcker

No hay estructura en la Tierra capaz de resistir la fuerza de una estrella que explota y, si pudiera reproducirse con éxito la gran explosión ("big bang"), ello destruiría toda la materia que conocemos, incluidos los propios experimentadores. Astrofísicos y cosmólogos deben, pues, complementar la observación con hipótesis sobre el comportamiento de la materia sometida a presiones extremas y a temperaturas y densidades elevadas. La materia en tales condiciones puede resultar bastante exótica, quizá sólo consistente en un gran número de quarks libres. No obstante, valiéndose de potentes aceleradores y refinados modelos teóricos, los físicos de los principales centros de investigación mundiales están examinando cuantitativamente esta materia ultradensa, y en particular analizan su ecuación de estado nuclear.

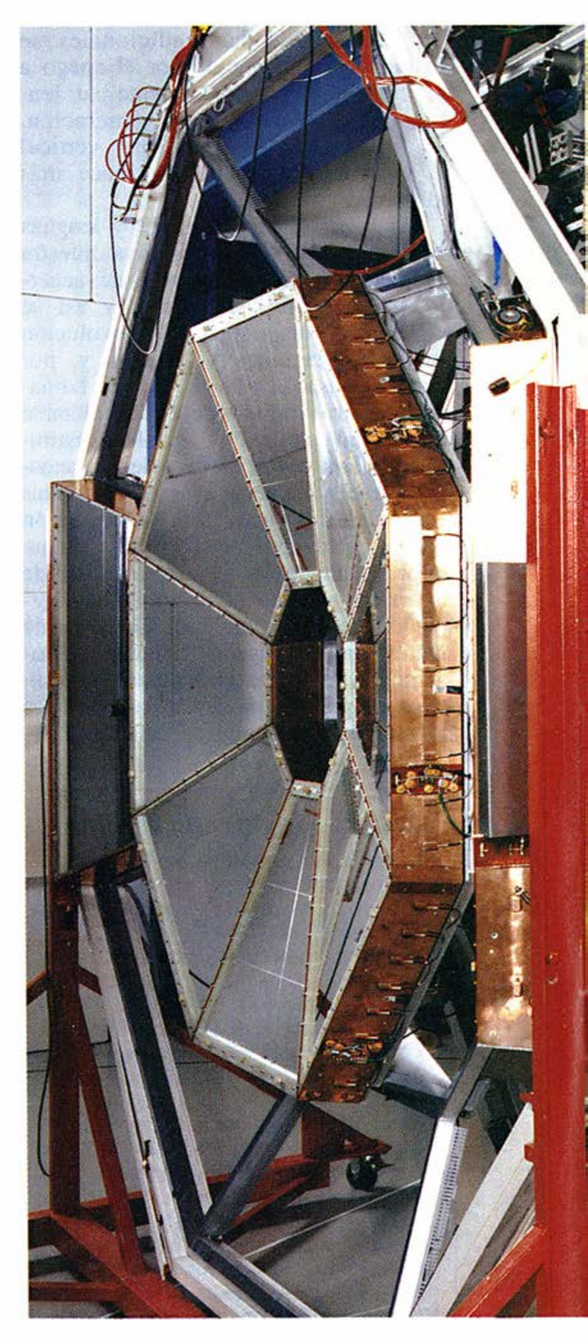
Una ecuación de estado expone cómo varía la presión de la materia en distintos regímenes de densidad y de temperatura. En el mundo más accesible a nuestros sentidos, la ecuación detalla el comportamiento macroscópico de los cuatro estados, o fases, de la materia. Así, al nivel del mar, a la presión de una atmósfera normalizada, el agua se solidifica al enfriarse bajo cero grados Celsius y se convierte en vapor al rebasar los 100 grados C. A temperaturas todavía mayores, el vapor de agua se disocia en sus iones constitutivos de hidrógeno y oxígeno o los electrones se desprenden de sus átomos, formando un estado que se denomina plasma.

La materia nuclear presenta "fases" semejantes. Por analogía, los núcleos masivos formados por muchos nucleones (protones y neutrones) representarían la fase líquida; la fase sólida podría corresponder a condensaciones del fluido nuclear, tales como las partículas llamadas isómeros de densidad; la fase de vapor consistiría en un gas diluido de núcleos ligeros y de nucleones libres, y la fase de plasma, en un conjunto de quarks y gluones libres. Los quarks son los constituyentes fundamentales de los hadrones, la clase de partículas que abarca protones y neutrones (cada uno de ellos compuesto de tres quarks) y otras partículas menos corrientes, como los piones (formados por un quark y un antiquark). Los gluones ligan los quarks entre sí.

Mediante sencillos experimentos con aparatos de laboratorio ordinarios pueden reproducirse las fases del agua y a partir de ahí determinar su ecuación de estado. Quizá la mejor manera de expresar los correspondientes datos sea un diagrama de fases que represente la densidad en función de la temperatura, y en el que las fases vengan delimitadas por curvas que comprendan puntos tales como los de cero y 100 grados C, a una atmósfera.

Un diagrama parecido puede representar las distintas transiciones de fase en la ecuación de estado nuclear, si bien los valores exactos de las curvas limítrofes son mucho más difíciles de determinar que en el caso del agua. Los nucleones se adhieren fuertemente

HANS GUTBROD Y HORST STÖCKER trabajan en física nuclear desde enfoques distintos y complementarios. Gutbrod es experimentalista y pertenece al Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN) próximo a Ginebra y al Instituto de Investigación en Iones Pesados (GSI) de Darmstadt; se doctoró en el Instituto Max Planck de física nuclear en Heidelberg y ha participado en una serie de desarrollos esenciales en esta rama de la física, entre ellos los descubrimientos de los fenómenos de flujo y las ondas de choque nucleares. Stöcker es teórico y da clases en la Universidad de Frankfurt. Desarrolla, al propio tiempo, su investigación en el GSI y es consultor del Laboratorio Lawrence en Berkeley, el Laboratorio Nacional de Brookhaven y el Laboratorio Nacional Lawrence en Livermore.



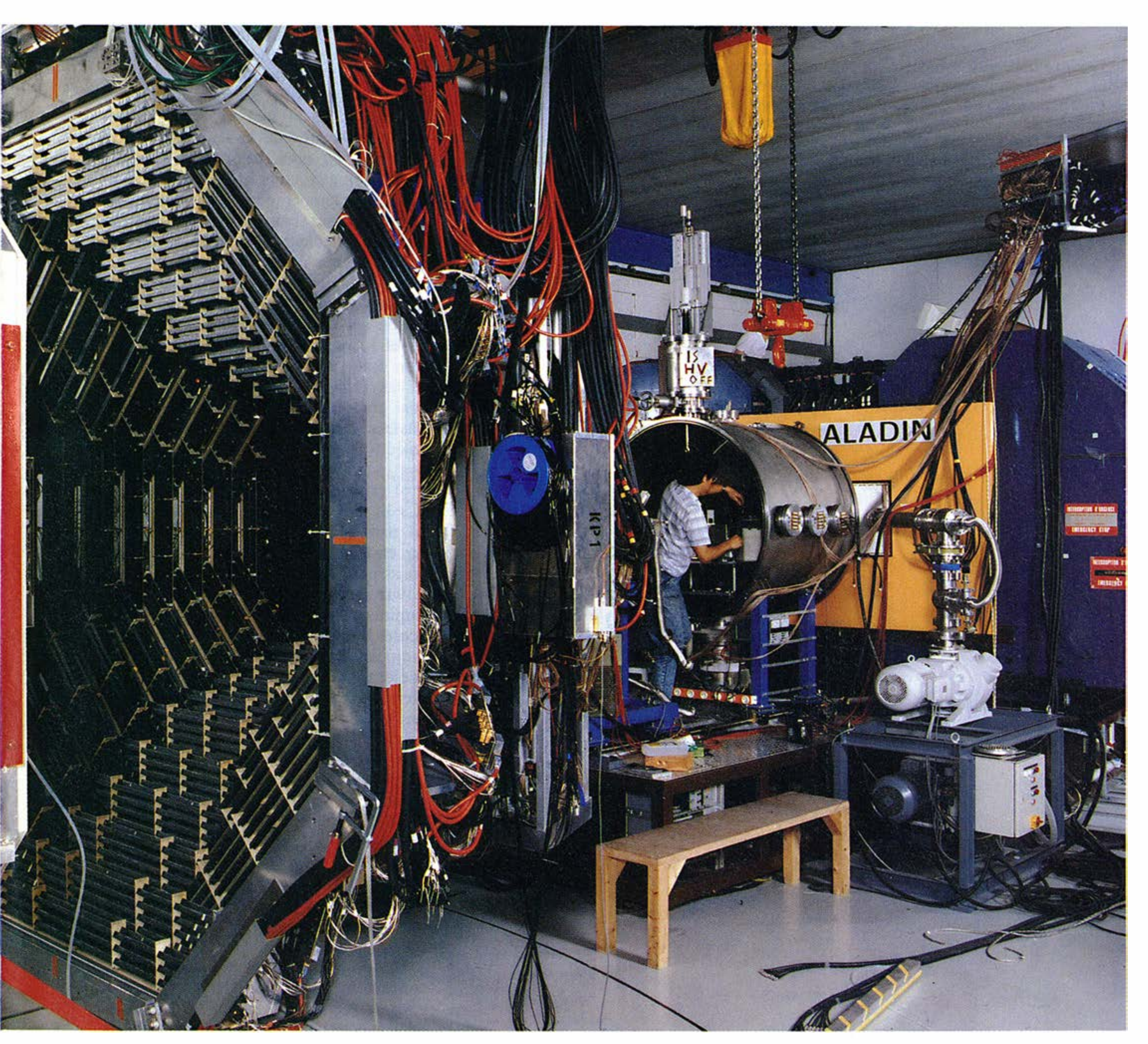
1. DETECTOR DE PARTICULAS del Instituto de Investigación de Iones Pesados, que registra centenares de sucesos de colisión por segundo.

entre sí, "hirviendo" sólo cuando la temperatura alcanza los 50.000 o 100.000 millones de kelvins.

A fin de analizar la ecuación de estado nuclear, es decir, la variación de la presión con la temperatura y la densidad, los investigadores comenzaron por desarrollar modelos teóricos, descripciones matemáticas que suelen partir de la energía que tiene cada protón y neutrón del núcleo. Esta energía depende de la densidad y de la temperatura en el interior del núcleo. Se espera que la presión del sistema aumente al crecer la densidad y la energía por partícula.

Estos cálculos tan sencillos se basan en el único punto de la ecuación de estado conocido con precisión hasta ahora: el estado fundamental de los núcleos, en el que la presión y la temperatura son cero y la densidad nuclear es de unos 3×10^{14} gramos por centímetro cúbico. A partir de ahí los cálculos se extrapolan a temperaturas y densidades finitas, suponiendo que ciertos parámetros se mantienen constantes. Tales parámetros pueden, sin embargo, no ser válidos en las condiciones extremas de calor y densidad (o incluso dilución) que reinan cuando algunas estrellas mueren. A medida que la materia estelar colapsa contrayéndose, la densidad nuclear en el centro empieza a subir, llegando a alcanzar un valor de cinco a diez veces la densidad interna de un núcleo corriente. La materia que se precipita hacia el interior choca contra el núcleo duro y forma lo que será la nueva estrella de neutrones. Al mismo tiempo, una onda de choque se propaga hacia fuera y produce un estallido de materia y de luz desde la estrella, que es observado en la Tierra como una supernova.

Hans A. Bethe, de la Universidad de Cornell, Gerald Brown, de la estatal



Las partículas producidas por un haz de iones pesados que chocan con un blanco viajan de izquierda a derecha. Las estructuras octogonales detectan los fragmentos emitidos perpendicularmente a la dirección del haz. El haz entra en el espectrómetro Aladin, preparado en la imagen para un experimento. Aladin detecta las partículas del haz que sólo han rozado el blanco. Estas medidas ayudan a descifrar la ecuación nuclear de estado.

de Nueva York en Stony Brook, y Sid Kahana, del Laboratorio Nacional Brookhaven en Upton, y sus colegas argumentan que las potentes explosiones de supernovas sólo pueden producirse si la ecuación de estado nuclear es extremadamente "suave", es decir, si la materia nuclear se comprime con bastante facilidad, de manera que un aumento de la densidad ocasione solamente un ligero incremento de la presión.

Cabe preguntar si una ecuación de estado supersuave puede estabilizar las estrellas de neutrones, evitando así que se transformen en agujeros negros. Aunque desde luego se han observado estrellas de neutrones con masas bastante bajas, Norman K. Glendenning, del Laboratorio Lawrence en Berkeley, ha demostrado que la ecuación de estado nuclear debe ser mucho más rígida, es decir, la presión y la energía por partícula deben aumentar más deprisa que lo que indicarían los cálculos de supernovas simplificados.

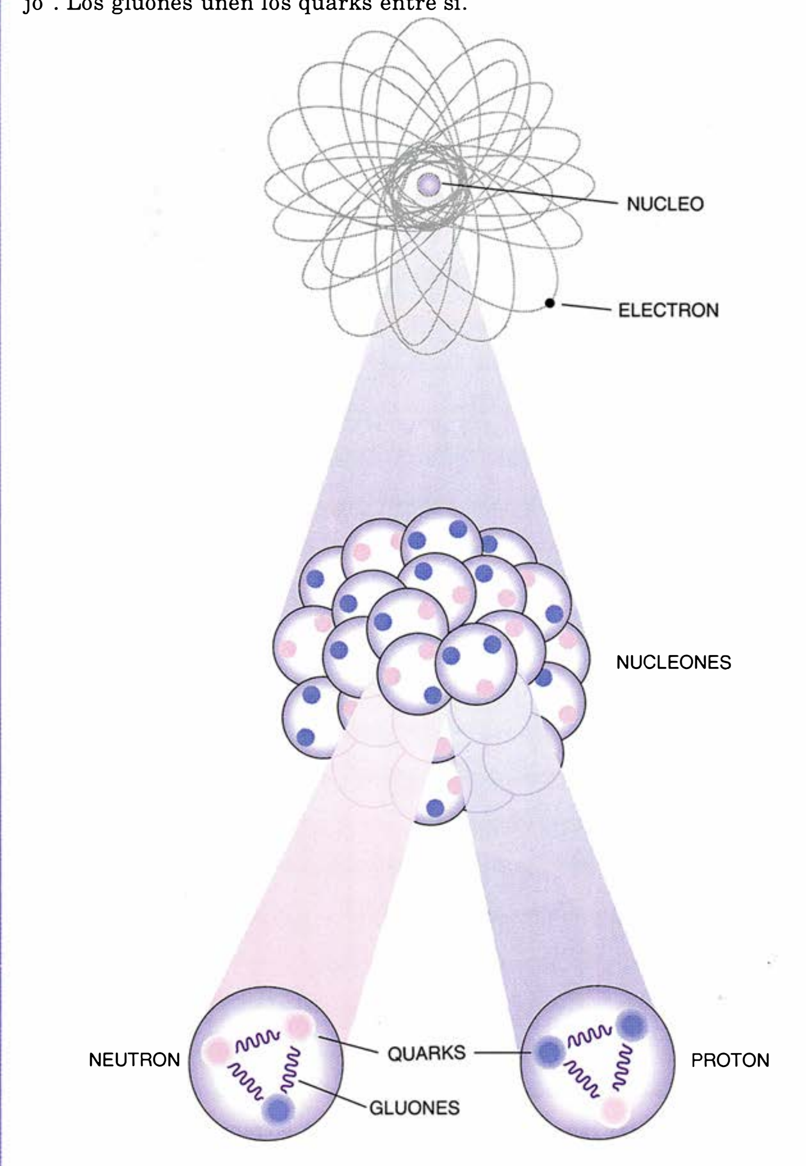
Evidentemente, la ecuación de estado nuclear en ésta y otras situaciones será difícil de encontrar si se carece de datos experimentales. ¿Cómo pueden crearse en un laboratorio condiciones parecidas a las que se dan cuando mueren las estrellas o las que existían en el universo poco después de la gran explosión? Ello se consigue produciendo una "pequeña explosión".

Los trabajos para conseguir un estado de la materia de tal densidad y temperatura empezaron a finales de los años sesenta e inicios de los setenta. Fue por entonces cuando el equipo de Werner Scheid y Walter Greiner, de la Universidad de Frankfurt, así como George F. Chapline, Michael H. Johnson, Edward Teller y Morton S. Weiss, del Laboratorio Nacional Lawrence en Livermore, formularon una propuesta, consistente en generar una onda de choque de alta densidad mediante la colisión entre dos núcleos pesados y acelerados hasta una velocidad superior a un cuarto de la velocidad de la luz. Una tal onda de choque comprimiría la materia nuclear logrando densidades y temperaturas suficientemente elevadas para comprobar la ecuación de estado nuclear y mejorar las predicciones acerca de la misma.

Por imaginar los investigadores que los núcleos se parecían bastante a gotas de agua, su descripción se denomina el modelo hidrodinámico. Una colisión entre gotas nucleares esencialmente las convierte en fase de vapor, lo cual comprende numerosas partículas y núcleos ligeros que reciben el nombre colectivo de fragmentos.

La estructura de la materia

Los átomos, que constituyen toda la materia, constan de electrones y núcleos. Los núcleos están formados por protones y neutrones, que reciben el nombre colectivo de nucleones. A su vez, los nucleones se componen de quarks. Dos quarks "arriba" (cada uno con carga eléctrica +2/3) y un quark "abajo" (carga −1/3) forman el protón de carga positiva, mientras que el neutrón, partícula neutra, comprende un quark "arriba" y dos quarks "abajo". Los gluones unen los quarks entre sí.



El primer —y durante mucho tiempo el único— dispositivo experimental para probar la idea de crear ondas de choque nucleares fue el Bevalac, construido en 1974 en el Laboratorio Lawrence en Berkeley (LBL), el cual suministra energía a un haz de iones, acelerándolos. Merced a posteriores mejoras tecnológicas, el Bevalac ha acelerado iones hasta energías comprendidas entre uno y dos mil millones de electronvolts (GeV), dependiendo de la masa de los núcleos, energías que corresponden a casi el 95 por ciento de la velocidad de la luz, de un orden muy superior a la velocidad del sonido. El haz acelerado colisiona entonces con los núcleos de un blanco estacionario, de lo cual resultan fragmentos que ofrecen información sobre la temperatura y la presión en la colisión y, por tanto, sobre la ecuación de estado nuclear.

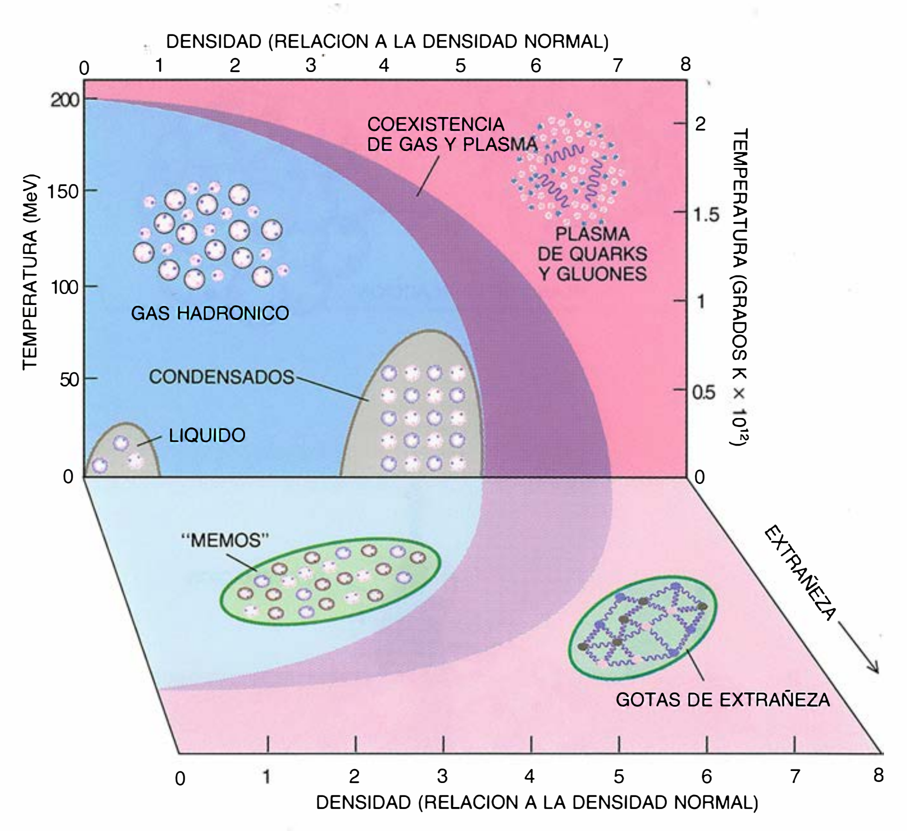
Las fotografías obtenidas durante la colisión aportaron los primeros medios para detectar los fragmentos. Las imágenes consistían en un conjunto de trazas dejado por las partículas al desplazarse a través de un medio. Erwin Schopper, de la Universidad de Frank-

furt, Harold H. Heckman, de la Universidad de California en Berkeley, e Ingvar Otterlund, de la Universidad de Lund, dirigieron varios grupos experimentales que iniciaron esta técnica de investigación.

Sin embargo, debido a la lentitud del análisis visual de los datos ha sido difícil alcanzar resultados convincentes y estadísticamente significativos. Los detectores electrónicos mejoraron la velocidad del análisis, pero sólo permitieron identificar una o muy pocas partículas en cada colisión; además, no podían distinguir los impactos rasantes menos violentos (y menos interesantes) de las colisiones frontales. Por consiguiente, los investigadores elaboraron sistemas de detección más complejos. En particular, descubrieron que se puede identificar los sucesos centrales midiendo el número total de partículas emitidas en un impacto: si este número es elevado, el proyectil y el blanco han chocado frontalmente.

Un instrumento capaz de identificar las colisiones centrales es la cámara de avalancha ("streamer chamber") del LBL. Reinhard Stock, de la Universidad de Frankfurt, Rudolf Bock, del Instituto de Investigación en Iones Pesados (GSI) de Darmstadt, y Howard G. Pugh, del LBL, dirigieron un equipo conjunto del LBL y el GSI que utilizó esta cámara por primera vez. Toda reacción interesante fue fotografiada por varias cámaras, y el análisis de la curvatura y espesor de las trazas reveló las cantidades de movimiento y la carga de cada fragmento.

Un grupo del GSI y del LBL encabezado por Arthur M. Poskanzer, Hans-Georg Ritter y uno de nosotros (Gutbrod) se ha concentrado en otro instrumento, desarrollando el primer detector electrónico de la física nuclear que registra información sobre una superficie esférica completa. El espectrómetro "Bola de Plástico", así se llama el detector, recopila datos a alta velocidad que identifican la masa, la carga, la energía y el ángulo de emisión de casi todas las partículas cargadas procedentes de muchos sucesos.



2. EL DIAGRAMA DE FASE representa gráficamente la ecuación de estado nuclear. En su fase normal, la materia nuclear se parece a un líquido. Aumentando la temperatura o la densidad, los núcleos "hierven" y pasan a la fase gaseosa hadrónica. A densidades extremas y bajas temperaturas, los nucleones pueden "congelarse", formando condensados. Un mayor calentamiento o compresión produciría la fase de plasma, consistente en quarks y gluones libres. Las fases de gas y plasma pueden coexistir en una extensa región. También pueden formarse partículas que tienen quarks extraños, tales como los objetos metastables multiextraños ("memos") y las gotas de extrañeza.

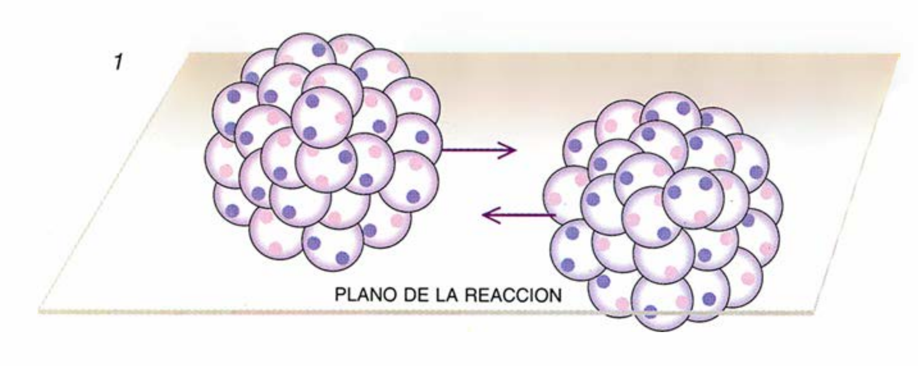
Las prestaciones de la Bola de Plástico resultaron ser muy importantes para el estudio de las colisiones centrales de núcleos masivos. Algunos teóricos habían criticado en duros términos las predicciones de la escuela de Frankfurt, afirmando que los núcleos no se detendrían en el choque, sino que pasarían uno a través de otro, por lo cual no se crearían en el laboratorio ondas de choque ni materia de alta densidad.

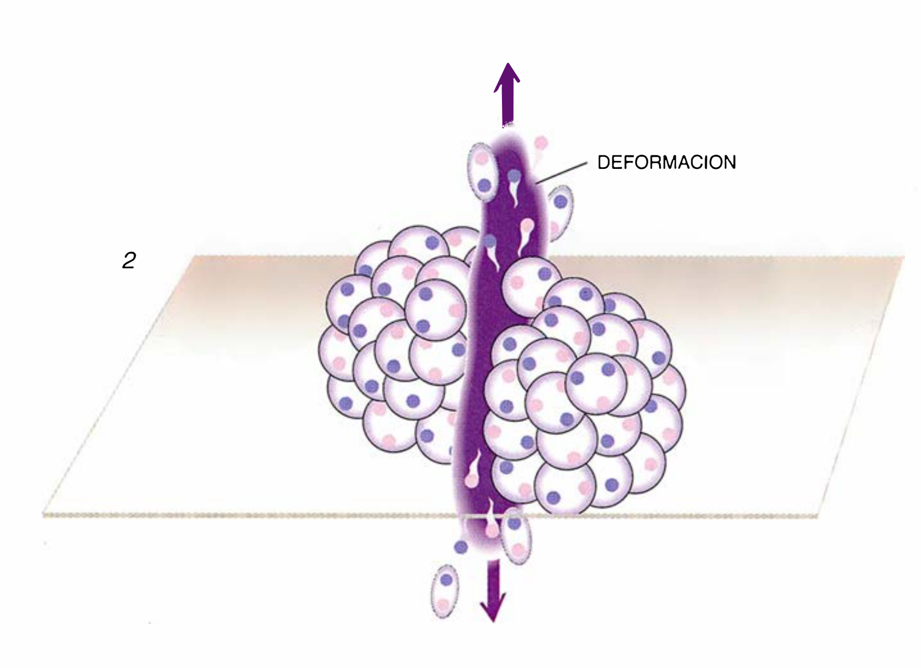
Sin embargo, en las primeras pruebas, el grupo Bola de Plástico observó que los núcleos se detienen uno a otro a energías altísimas, de 2 GeV por nucleón. La demostración más clara llegó en 1990, cuando al analizar los datos tomados cinco años antes se apreció que el proyectil inicial y el núcleo tomado como blanco desaparecían del todo; el montón de residuos nucleares resultante se encontraba prácticamente en reposo en el lugar donde debería estar el centro de masas de los dos núcleos.

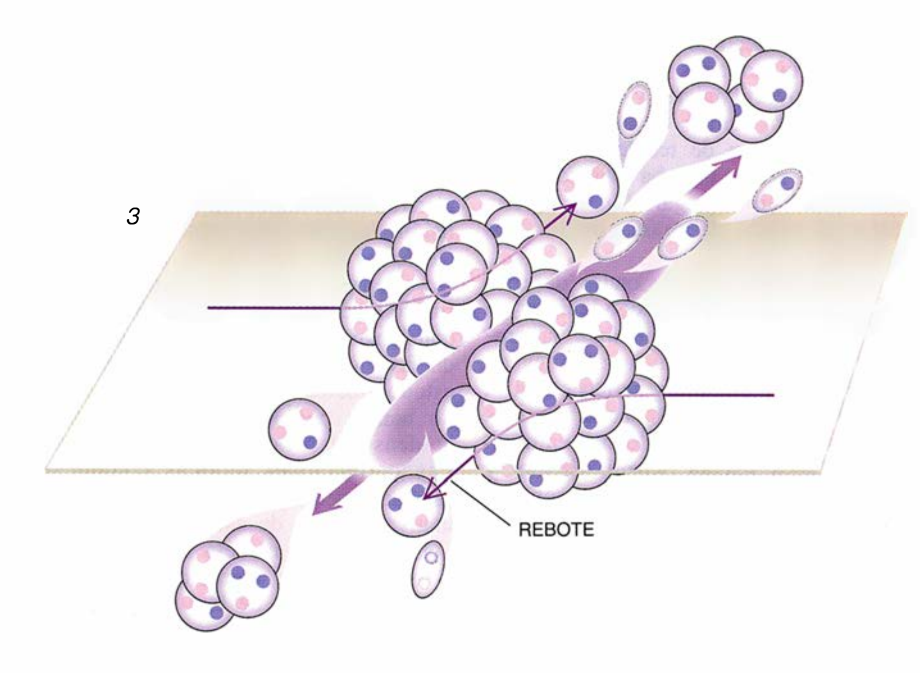
La formación de las ondas de choque nucleares debería conducir a un segundo resultado observable: la producción de cantidades apreciables de piones. Estas partículas pertenecen a la familia de los mesones, cuya masa es moderada; ligan los nucleones entre sí. En los años setenta Scheid, Greiner y uno de nosotros (Stöcker) sugerimos que si el modelo hidrodinámico de la onda de choque es correcto, la producción de piones deberá crecer linealmente a medida que aumente la energía del bombardeo, con un ritmo de crecimiento que será medida directa de la ecuación de estado nuclear. El grupo de la cámara de avalancha del GSI-LBL comprobó esta teoría a comienzos de los 80 y realmente observó el crecimiento lineal predicho.

El número de piones y su espectro de energías, tales como se recogen en los datos de la cámara de avalancha, permitieron a los investigadores calcular la temperatura efectiva del paquete de materia nuclear detenido por el choque. Ambos conjuntos de cálculos dieron valores de temperatura de hasta $1,5 \times 10^{12}$ kelvins (150 millones de electronvolts, MeV) en la zona de colisión, las más altas temperaturas nucleares jamás medidas en un laboratorio. Representando la temperatura en función de la densidad de los núcleos colisionantes se obtendría un diagrama de fases que caracteriza la ecuación de estado nuclear. Sin embargo, todavía no hemos podido medir directamente la densidad alcanzada en la colisión. Las correcciones teóricas complican sustancialmente la determinación cuantitativa a partir de estos datos.

Utilizando el modelo hidrodinámico, Gerd Buchwald, Gerhard Graebner y Joachim Maruhn, de la Universidad de Frankfurt, formularon una tercera predicción que demostraría la formación de ondas de choque nucleares: los fragmentos de los núcleos detenidos por el choque se deberían desplazar todos juntos en una dirección lateral, "transversal" con respecto a la direc-







3. LOS NUCLEOS COLISIONANTES proporcionan el mecanismo básico para investigar la ecuación de estado nuclear. En la figura, dos núcleos de oro chocan ligeramente descentrados (*1*). En la zona comprimida caliente formada por la onda de choque, la materia compuesta de protones, piones y otras partículas ligeras (quizá quarks y gluones) se deforma perpendicularmente al plano de la reacción (*2*). Los restos de los dos núcleos rebotan luego entre sí (*3*).

ción original de movimiento. Cuanto más centrales sean las colisiones, más acusado será el desplazamiento colectivo lateral.

Los nucleones que no den directamente en el blanco deberán rebotar en la región central, caliente y densa. Se siguen moviendo en el plano de colisión, de manera muy parecida a una bola de billar que recibe un impacto rasante. Este movimiento de rebote actúa a modo de barómetro, midiendo la presión ejercida por la densa materia central. Los investigadores determinan cuantitativamente la presión examinando el flujo lateral: cuanto mayor sea éste, mayor será la presión.

Los primeros experimentos con la Bola de Plástico utilizaron haces de iones de calcio. Las partículas emitidas en las colisiones de unos iones tan ligeros no fluían lateralmente, como había predicho la teoría. Sin embargo, al probar con haces de iones más pesados, de niobio y oro, los movimientos laterales fueron inequívocos, incluso en colisiones descentradas. Los datos confirmaron los cálculos del modelo hidrodinámico.

Quedaba todavía por explicar la dependencia que mostraban los datos con respecto a la masa del proyectil y el blanco, especialmente el pequeño flujo observado en el caso del calcio. Arnold R. Bodmer, actualmente en la Universidad de Illinois en Chicago, y Bernd Schürmann, de la Universidad de Munich, sugirieron que la causa podía encontrarse en algunos efectos de ausencia de equilibrio, tales como la viscosidad nuclear y un valor pequeño, pero finito, del recorrido libre medio (distancia media que recorre una partícula entre choques sucesivos con otras partículas).

Hans Kruse, Barbara V. Jacak, Joseph Molitoris y Stöcker, entonces en la Universidad estatal de Michigan, demostraron que esto era real y cuantitativamente posible. Más tarde, otros teóricos —Jörg Aichelin, de la Universidad de Heidelberg, y Albrecht Rosenhauer, Georg Peilert, Christoph Hartnack, María Berenguer, Walter Greiner y Stöcker, de la Universidad de Frankfurt—, concibieron un modelo más general, denominado modelo cuántico de la dinámica molecular, en el que los nucleones se tratan como pequeños paquetes de ondas desplazados bajo las influencias mutuas de los otros nucleones.

A semejanza del modelo hidrodinámico, el modelo cuántico de la dinámica molecular predice un flujo colectivo lateral. Además de ello, el modelo también explica por qué los núcleos pesados crean más flujo lateral que los

ligeros. En efecto, la compresión en la zona de choque es mayor cuando chocan iones pesados que cuando lo hacen iones ligeros, y a medida que aumenta la presión en dicha zona también crece la fuerza que la colisión transmite a la materia circundante, de la cual se forman los fragmentos. Para un observador, la transferencia de cantidad de movimiento se manifiesta por un aumento del flujo de fragmentos en el plano de la colisión. Los experimentos de la Bola de Plástico analizados por Karl-Heinz Kampert, de la Universidad de Münster, han confirmado la teoría propuesta por Peilert y sus colegas.

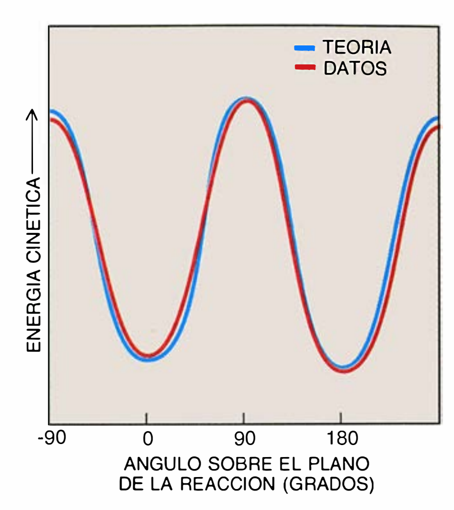
Los teóricos de Frankfurt anticiparon un cuarto efecto, experimentalmente observable, en la colisión de núcleos: la materia de la parte central sufrirá una deformación tan fuerte que parte de la misma será expulsada en dirección perpendicular al plano de colisión, según un fenómeno denominado deformación fuera del plano. En 1989 Kamper y Hans-Rudi Schmidt, del GSI, analizaron los datos de la Bola de Plástico y confirmaron la existencia de este fenómeno, descubriendo además que la intensidad de la deformación crece linealmente con la masa de los núcleos que chocan. El resultado apoya la predicción de Hartnack y sus colaboradores y demuestra inequívocamente que la región central comprimida tiene una densidad suficiente para el estudio de la ecuación de estado.

Tal como hemos anticipado, la materia nuclear comprimida ha proporcionado mucha información sobre el medio nuclear caliente y denso. Los datos actuales indican que la ecuación de estado parece "endurecerse" continuamente: la energía de cada nucleón aumenta con la densidad. Las temperaturas alcanzadas son tan altas que los núcleos pesados hierven y se convierten en un vapor de núcleos ligeros y nucleones libres. Sin embargo, estos resultados se han obtenido sólo para densidades moderadamente elevadas, correspondientes a una densidad energética máxima de dos a tres veces la de la materia nuclear normal, mientras que una descripción completa de la ecuación de estado nuclear, en particular la exploración de la fase de plasma, requiere observar densidades energéticas mucho más altas que las alcanzadas por los aceleradores existentes.

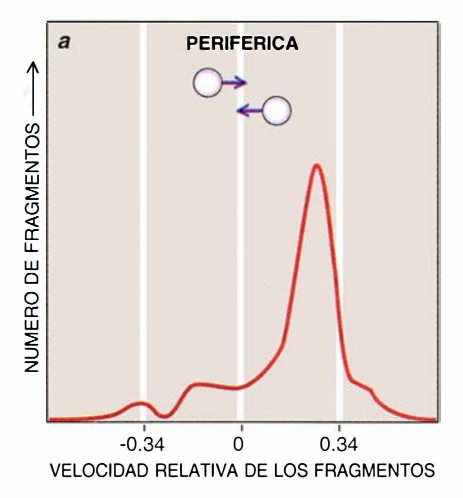
Para crear la fase de plasma los núcleos muy pesados deben colisionar a energías muy superiores a 2 GeV, energías que a veces se denominan ultrarrelativistas, pues la velocidad de los núcleos se aproxima a la velocidad de la luz. Los cálculos deben entonces tener en cuenta los efectos de la relatividad. Incluso el nuevo Sincrotrón Schwerionen (SIS) del GSI, el acelerador de iones pesados más potente que hoy funciona, no llega a acercarse al régimen ultrarrelativista. En el verano de 1990, el SIS aceleró con éxito iones de oro, uno de los elementos naturales más pesados; está preparado para producir densidades que multiplican por un factor de dos a tres la densidad nuclear normal. Esta densidad, sin embargo, probablemente sólo llega a ser entre la mitad y un cuarto de la necesaria para simular la materia de las estrellas que colapsan.

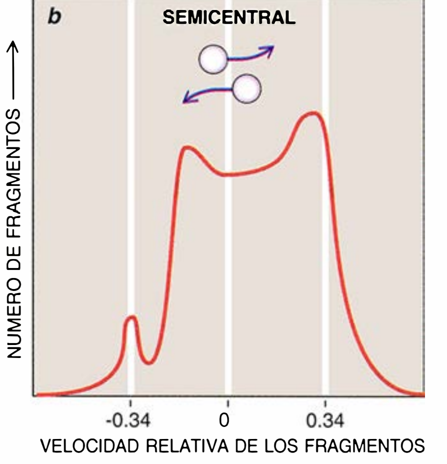
En el estado de plasma que esperamos crear a energías ultrarrelativistas, los quarks y los gluones ya no permanecerían confinados en el interior de los hadrones, sino que se propagarían a distancias comparables al tamaño del núcleo. En 1978, Chapline y Michael Nauenberg, de la Universidad de California en Santa Cruz, e, independientemente, Walter Greiner y Stöcker predijeron que las extremas densidades y temperaturas necesarias para la producción de materia quarkónica se pueden lograr en colisiones de iones pesados, a energías de unos 10 GeV por nucleón, pero sólo durante breves instantes.

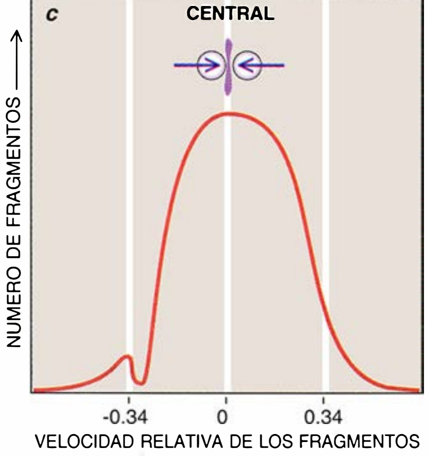
Existe un gran interés por provocar el choque entre núcleos muy pesados a tales energías, pues conocemos muy poco lo que sucede cuando dos nucleones (en el caso más general, dos hadrones) colisionan con semejante violencia. La tremenda cantidad de energía cinética liberada en una colisión inelástica no sólo se manifestaría en la energía y cantidad de movimiento de los elementos constitutivos originales que chocan, sino que además debería crear pares de partícula y antipartícula. Por ejemplo, si la energía cinética supera los 270 MeV, se forma un pion positivo y uno negativo.



4. DEFORMACION, un fenómeno que sólo recientemente ha tenido confirmación experimental. Se manifiesta por un fuerte incremento en la energía cinética de las partículas emitidas a 90 grados por encima y por debajo del plano de la reacción.







5. LA INTENSIDAD DEL IMPACTO determina si dos núcleos (cada uno de los cuales se mueve aquí a 0,34 veces la velocidad de la luz) se detienen mutuamente. Las velocidades de los fragmentos resultantes tienden hacia cero al hacerse más directas las colisiones (*a* y *b*). En las colisiones centrales, prácticamente toda la masa yace en reposo y concentrada allá donde debería estar el centro de masas de los dos núcleos (*c*).

A fin de describir tales colisiones ultrarrelativistas, los teóricos de la Universidad de Lund y de la Universidad de Orsay han representado la colisión de hadrones como la excitación de dos cuerdas sólidas en vez de la colisión de gotas líquidas. Dichas cuerdas se extienden cual gomas elásticas entre los quarks que han sido alcanzados y los que no; las cuerdas almacenan energía potencial a medida que sus extremos se separan a gran velocidad. Finalmente, las cuerdas se rompen y se fragmentan en pares quark-antiquark; el número de tales pares refleja la transferencia de energía y de cantidad de movimiento en la colisión. Los pares de quarks se convierten rápidamente en hadrones (en su mayor parte piones). En una colisión nuclear pueden coexistir muchas cuerdas y hadrones, y en tal caso el sistema podría transformarse en el plasma de quarks y gluones. Los hadrones se formarían luego de manera muy parecida a como lo hicieron poco después de la gran explosión, esto es, condensándose a partir del plasma de quarks y gluones en una transición de fase que no ocurrió hasta que la expansión redujo la densidad de energía, es decir, hasta que el sistema se enfrió.

A fin de predecir el resultado experimental de las colisiones relativistas de iones pesados, Heinz Sorge, Andreas von Keitz, Raffaele Mattiello, Andre Jahns, Luke Winkelmann, Thomas Schönfeld, Walter Greiner y Stöcker, de la Universidad de Frankfurt, desarrollaron una extensión relativista del modelo cuántico de la dinámica molecular, pronosticando que se deberían observar sustancialmente más detenciones y densidades mucho mayores en las colisiones entre núcleos pesados, como los iones de oro, que en las colisiones entre núcleos ligeros, como los de silicio, por ejemplo. Sus cálculos indicaban además que, incluso a estas energías ultrarrelativistas, debería observarse un flujo colectivo. Los efectos predichos de rebote y de deformación también aportarían datos relativos a la ecuación de estado del plasma de quarks y gluones, pudiendo además servir aquí como barómetros para medir la presión de la materia quarkónica ultradensa.

Los modelos teóricos han alcanzado un extraordinario grado de refinamiento. Además de ser capaces de predecir los resultados experimentales, también son utilizables para describir los estados transitorios de una colisión, especialmente las primeras fases en las que la materia está sometida a máximo calor y presión.

No obstante, los aceleradores existentes no son capaces de comunicar a los iones muy pesados (los que contienen unos 200 nucleones) energía suficiente para formar la fase de plasma. Aunque pudieran hacerlo, muchas de las condiciones necesarias para formar el plasma de quarks y gluones seguirían desafiando la comprobación experimental. Por ejemplo, el espectro de los piones producidos en la colisión debería indicar la formación del plasma, pero están sujetos a una evolución dinámica complicada durante la expansión del sistema, y este proceso puede distorsionar la información que ofrecen. Por si fuera poco, no se sabe cómo determinar el tamaño exacto de la zona de reacción correspondiente a la compresión máxima.

Debido a las limitaciones de los aceleradores de iones pesados, algunos físicos están buscando obtener plasma mediante la colisión de iones ligeros, formados por unos 30 nucleones. Las medidas señalan densidades energéticas de 10 a 20 veces la densidad energética nuclear normal, próximas a la densidad crítica que se considera necesaria para formar el plasma de quarks y gluones.

Sin embargo, los resultados del GSI-LBL plantean inmediatamente la cuestión de si se puede formar plasma de quarks y gluones cuando chocan iones ligeros. Lo más probable es que estos iones ligeros no sean lo bastante gruesos para frenarse entre sí y formar por lo tanto un estado de materia densa. Pero aunque pudiera formarse plasma de quarks y gluones en los sistemas ligeros, este plasma se expandiría rápidamente, se enfriaría y sufriría una transición de fase a materia hadrónica. Se deberán encontrar por tanto señales que provengan solamente de la existencia transitoria del plasma de quarks y gluones. Tales señales serían más difíciles de detectar en sistemas de iones ligeros que en los pesados, a causa del elevado ruido de fondo.

Ciertos investigadores preferirían buscar la fase de materia quarkónica mediante partículas que interaccionan débilmente, tales como fotones o pares de leptones (electrones, muones y sus correspondientes partículas de antimateria). Los fotones y los leptones se forman en la parte del sistema donde el calor es máximo y penetran el material de su alrededor sin reaccionar, proporcionando así una señal directa de la fase de plasma inicial según la describe la ecuación de estado nuclear.

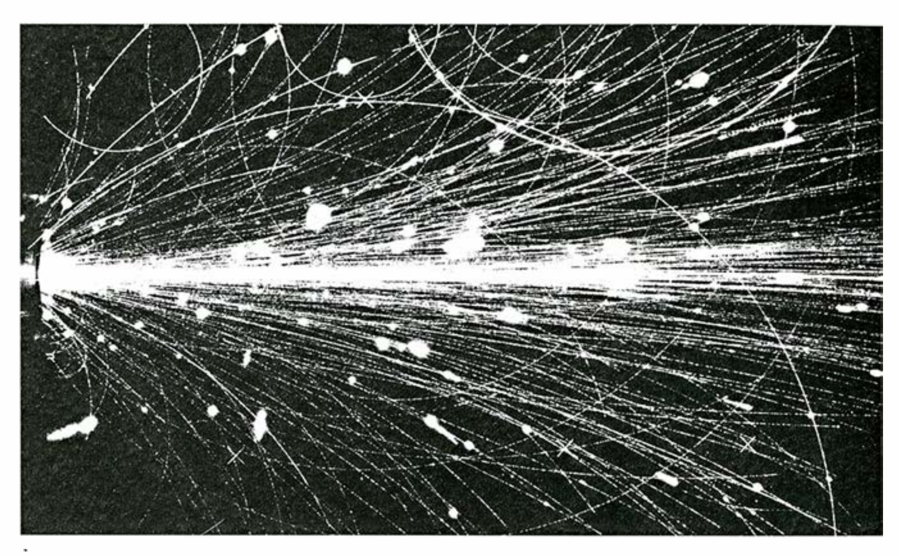
Las mencionadas partículas han proporcionado signos tentadores de la producción de la fase de plasma. En 1988 un equipo del CERN detectó una espectacular disminución en la producción de pares muon-antimuón, manifestación del plasma que había sido predicha por Tetsuo Matsui, del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), y Helmut Satz, del CERN. Estas partículas provienen de la desintegración de determinados hadrones. Sin embargo, como han demostrado Sean

6. CAIDA DE LA TEMPERATURA DEL UNIVERSO desde la gran explosión. Se cree que durante el primer microsegundo toda la materia existió en forma de plasma de quarks y gluones. A medida que el universo se expandió y enfrió, el plasma se condensó en materia más compleja, llegando finalmente a los átomos que observamos hoy día. Los aceleradores que hoy se construyen deben ser capaces de calentar los núcleos hasta 2×10^{12} kelvins (200 millones de electronvolts, MeV), creando quizás la tan buscada materia quarkónica primordial.

Gavin y Miklos Gyulassy, del LBL, la observada disminución puede explicarse mediante la formación de fluido hadrónico ultradenso en vez del plasma de quarks y gluones. Tal vez ofrezcan indicaciones más concluyentes los investigadores del CERN que actualmente están buscando fotones directos en las colisiones entre núcleos ligeros (azufre) y un blanco pesado (oro).

A mitad de la década de los ochenta, Peter Koch, de la Universidad de Ratisbona, Johann Rafelski, de la de Arizona, y Bernd Müller, de la de Duke, sugirieron la existencia posible de otra manifestación del plasma de quarks y gluones. En efecto, si se forma realmente plasma, lo más probable es que los abundantes gluones térmicos se fusionen para crear numerosos pares de quarks extraños y antiextraños. Dada la imposibilidad de que haya quarks aislados en un estado no ligado, éstos se condensarían en un elevado número de partículas elementales extrañas y antiextrañas, llamadas kaones e hyperones. La abundante producción de tales entes señalaría la presencia de un plasma de quarks y gluones.

Utilizando las instalaciones del Laboratorio Nacional de Brookhaven, un equipo japonés-americano, constituido por expertos de 10 instituciones, daba cuenta, recientemente, del incremento de la producción de extrañeza. En efecto, al bombardear un blanco de oro con un haz de silicio de 15 GeV por nucleón, se apreció un fuerte aumento en la producción de kaones. Dos equipos internacionales que trabajan en el CERN han aportado más pruebas del aumento de extrañeza. Los grupos, encabezados por Emanuele Quercigh, del CERN, y Stock, observaron un gran aumento del número de antihyperones producidos. Todas estas observaciones pueden explicarse por la formación de un plasma de quarks y gluones. Los estudios teóricos de Mattiello, Sorge, Walter Greiner y Stöcker indican, sin embargo, que el crecimiento de producción de kaones y sus espectros puede también entenderse si se forma un fluido hadrónico ultradenso, en vez de un plasma de quarks y gluones. No obstante, la producción de antihyperones ha desconcertado a muchos teóricos y sigue siendo un problema intrigante.



7. LAS TRAZAS DE LAS PARTICULAS producidas en una colisión entre dos núcleos informan sobre la dinámica de la interacción. Tales colisiones centrales (*izquierda de la imagen*) generan centenares de partículas cargadas, sobre todo protones y piones.

A partir de la fase de plasma pueden formarse otras partículas, incluso más exóticas. Su presencia confirmaría inequívocamente la existencia del plasma y proporcionaría una manifestación de la ecuación de estado nuclear en un dominio todavía sin explorar. Por ejemplo, la fase de plasma podría producir glóbulos consistentes en un gran número de quarks arriba ("quarks up") y quarks abajo ("quarks down"), que denominaremos gotas multiquarks. Estas gotas deberían ser relativamente masivas; de lo contrario, todos los núcleos serían inestables y se desintegrarían. Podrían, sin embargo, ser estables las gotas si también contuvieran quarks extraños. Sui Chin y Arthur K. Kerman, del MIT, y Larry D. McLerran y James D. Bjorken, entonces en la Universidad de Stanford, sugirieron dos razones para la estabilidad de tales "gotas de extrañeza" o "gotas extrañas".

La primera razón es que los estados cuánticos más bajos disponibles están ocupados. Por tanto, cualquier transición potencial a estos estados va contra el principio de exclusión de Pauli, según el cual cada estado cuántico sólo puede ser ocupado por una partícula. El principio de exclusión elimina la desintegración del quark extraño en un quark arriba.

La segunda explicación implica un aumento de la energía de enlace del sistema, siendo entonces razonable que la materia quarkónica extraña esté ligada con intensidad suficiente para hacerse absolutamente estable. Esta condición, propuesta por Bodmer, Edward Witten, de la Universidad de Princeton, y Edward Farhi y Robert L. Jaffe, del MIT, representaría el auténtico estado fundamental de la materia, es decir, el punto cero de la ecuación de estado nuclear.

Una conclusión de esta índole depende de una determinada elección de los parámetros de la ecuación de estado de la materia quarkónica, todavía desconocida. Otras teorías sostienen que una gota de quarks sólo puede ser metastable. La gota podría desintegrarse lentamente, emitiendo un nucleón y un pion e incluso podrían darse vidas medias más largas si la energía de la gota fuera tal que inhibiera la desintegración en un protón y un pion. Partiendo de los conocimientos actuales, no puede descartarse ni una ni otra forma de estabilidad de las gotas de extrañeza ("strangelets").

En 1987 Carsten Greiner, de la Universidad de Erlangen, Dirk Rischke, de la Universidad de Frankfurt, Koch y Stöcker descubrieron un proceso que podría producir gotas de materia quarkónica extraña en colisiones de núcleos pesados. Estas predicciones han estimulado la colaboración entre grupos encabezados por Jack Sandweis, de Yale, Henry J. Crawford, del LBL, y P. Buford Price, de la Universidad de California en Berkeley, junto con un grupo del CERN.

Además, una producción abundante de extrañeza ofrece la interesante posibilidad de producir objetos multiextraños exóticos metastables (denominados "memos" como las siglas de su expresión en inglés), los cuales consistirían predominantemente en hyperones. Tanto los "memos" como las "gotas de extrañeza" se detectarían con presteza, ya que, a diferencia de los núcleos normales, se les considera eléctricamente neutros o de carga negativa, por lo cual sus movimientos a través de un campo magnético se distinguirían fácilmente de los de aquellos núcleos.

Los físicos se disponen a aprovechar una serie de fascinantes oportunidades para el análisis de la ecuación de estado nuclear y la fase de plasma. La instalación SIS del GSI ha iniciado un nuevo programa de investigación. Físicos de todo el mundo han empeza-

do incluso a debatir planes para crear aceleradores capaces de funcionar a energías ultrarrelativistas. El proyecto Booster de Brookhaven, en fase de desarrollo, permitirá hacia 1994 que en el Sincrotrón de Gradiente Alternante (AGS) colisionen iones de oro a 11 GeV por nucleón. En Brookhaven se prepara también el Colisionador Relativista de Iones Pesados, "Relativistic Heavy Ion Collider" (RHIC), ingenio que debería estar listo en 1997 y que acelerará iones de oro a 20 billones de electronvolts (TeV) por nucleón.

El CERN ha propuesto construir para 1994 un inyector que acelere haces de plomo a 200 GeV por nucleón. La dirección del laboratorio también se propone instalar un nuevo acelerador, el Gran Colisionador Hadrónico, "Large Hadron Collider" (LHC), en el túnel del colisionador LEP del CERN. Las colisiones entre iones de plomo tendrían allí el efecto equivalente de más de 12.000 TeV por nucleón, con lo que podría abordarse el estudio de un régimen de la materia hadrónica totalmente desconocido.

A unas energías tan grandes, hasta las colisiones periféricas son muy prometedoras. Mathias Grabiak, Gerhard Soff y Walter Greiner, de la Universidad de Frankfurt, y otros acaban de sugerir que estas colisiones ultrarrelativistas de núcleos pesados pueden producir la tan buscada partícula de Higgs. Los teóricos piensan que esta partícula genera las masas de otras partículas fundamentales, tales como los bosones W y Z. Su descubrimiento aportaría la necesaria coherencia matemática al modelo estándar de las fuerzas de la naturaleza.

Sin duda, el progreso extraordinario que se ha dado en el estudio de la ecuación de estado nuclear sólo ha sido posible merced a la estrecha colaboración de teóricos, experimentadores e ingenieros. Los futuros experimentos de colisiones a altas energías pueden producir la fase de plasma de la materia nuclear, así como partículas exóticas hasta ahora jamás observadas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FROM QUARKS TO THE COSMOS: TOOLS OF DISCOVERY. Leon M. Lederman y David N. Schramm. Scientific American Library, 1989.

NUCLEAR EQUATION OF STATE, Part A: DISCOVERY OF NUCLEAR SHOCK WAVES AND THE EOS. NUCLEAR EQUATION OF STATE, Part B: QCD AND THE FORMATION OF THE QUARK-GLUON PLASMA. Dirigido por Walter Greiner y Horst Stöcker. Plenum Publishing, 1990.

SIMULATING HOT QUARK MATTER. Jean Potvin en *American Scientist*, vol. 79, n.º 2, págs. 116-129; marzo-abril de 1991.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Proteína amiloidea y enfermedad de Alzheimer

La acumulación excesiva de ese polipéptido en el cerebro insta la aparición de la enfermedad de Alzheimer. El estudio de los mecanismos responsables de la formación de los fragmentos proteicos nos dará la clave para su terapia

Dennis J. Selkoe

Imagínese el lector una situación en que, tras superar todos los escollos, grandes y chicos, que salen al paso de la vida, hubiéramos de afrontar la pérdida, implacable y devastadora, de los bienes más preciados que poseemos: capacidad de raciocinio y abstracción, facultad del lenguaje y memoria. Ese es el sino que aguarda a millones de personas de toda raza y etnia. El aumento sustantivo de la esperanza de vida que nos ha traído este siglo, merced, sobre todo, a una terapia eficaz contra las enfermedades infecciosas, permite que muchos alcancen la edad en que comienzan a menudear las formas degenerativas del cerebro; de modo particular, la enfermedad de Alzheimer.

Hemos crecido con el convencimiento de que nuestros abuelos se volvían olvidadizos y confusos porque "se les endurecían las arterias". Admitíase, sin más, que la demencia, el fracaso de la capacidad cognitiva, era un fenómeno natural asociado a la vejez. Las cosas han dado un vuelco en los últimos veinte años; la neuropatología ha puesto de manifiesto que las lesiones cerebrales descritas en 1907 por el psiquiatra bávaro Alois Alzheimer —placas seniles y nódulos neurofibrilares— tienen que ver con los episodios de demencia que sufren, al final de su vida, los ancianos de muchos países desarrollados.

DENNIS J. SELKOE se halla al frente del Centro de Enfermedades Neurológicas de Brigham y del Hospital de Mujeres de Boston. Enseña también neurología en la Facultad de Medicina de Harvard. Inició su formación médica en la Universidad de Columbia, recibiéndose de doctor por la de Virginia. Ha trabajado en bioquímica y biología de la neurona. En 1978 fundó un laboratorio de investigación para el estudio de la enfermedad de Alzheimer.

La pérdida de la memoria, del juicio y de la estabilidad emocional que la enfermedad de Alzheimer provoca se produce de manera gradual e inexorable. El paciente encuentra la muerte entre 4 y 12 años después del comienzo de la enfermedad, tras una fase terminal de postración y debilidad extremas. El coste económico que representa el diagnóstico, tratamiento y asistencia se eleva a centenares de miles de millones de pesetas en muchos países. Y lo peor: no se conoce ninguna terapia eficaz que retarde o frene su avance.

¿Por dónde empezar a abordar el problema? Esa es la pregunta que nos formulamos los interesados en descifrar sus mecanismos y, en última instancia, en detener su progresión. La respuesta nos lleva al estudio de la génesis de la alteración más característica de la enfermedad: la aparición de copiosas placas seniles en la corteza, el hipocampo, la amígdala y otras zonas del cerebro esenciales para la función cognitiva. La investigación reciente corrobora que el trabajo en ese sector está aportando claves fundamentales sobre los síntomas precoces de la presencia del mal.

Tras observación atenta al microscopio del cerebro de su primer paciente, Alzheimer escribió unas palabras proféticas: "Distribuidos por toda la corteza, especialmente en las capas superiores, se aprecian millares de focos producidos por el depósito de una sustancia peculiar." A lo largo de los últimos 7 años, muchos laboratorios aportaron pruebas sobre la naturaleza proteica de esa "sustancia peculiar", un polipéptido de unos 40 aminoácidos, que responde al nombre de beta-proteína amiloidea. Procede de la ruptura enzimática de una proteína precursora mucho mayor y codificada por un gen que se encuentra en el cromosoma 21.

El estudio de la beta-proteína amiloidea ha aclarado en parte la base genética de la enfermedad de Alzheimer. Se sabe, desde hace mucho tiempo, que obedece, en ciertos casos por lo menos, a determinadas anomalías congénitas. La mitad aproximada de los miembros de ciertas familias la padecen en cada generación; los individuos con síndrome de Down, que nacen con tres copias del cromosoma 21 en vez del par normal, suelen presentar prematuramente, a los 40 o 50 años, las lesiones cerebrales típicas de la enfermedad de Alzheimer. La conducta y la capacidad mental de muchos de los enfermos con el síndrome de Down entran en fase de ulterior decadencia por el mismo periodo.

Los avances en el conocimiento de los mecanismos genéticos que regulan la acumulación de la beta-proteína amiloidea nos descubren la razón del fracaso de los empeños precedentes en el tratamiento de la enfermedad de Alzheimer y nos encaminan hacia terapias más eficaces.

La historia de la beta-proteína de la enfermedad de Alzheimer nace con la neuropatología. Ya antes de Alzheimer, los patólogos sabían que la corteza del cerebro humano presentaba a veces un número variable de placas esféricas. Estas consistían en axones y dendritas dañados que ceñían una masa extracelular de sutiles filamentos.

1. PAPEL HIPOTETICO DE LA BETA-PROTEINA AMILOIDEA en la aparición de la enfermedad de Alzheimer. La beta-proteína amiloidea, que puede ser liberada por neuronas, células de la glía o del sistema circulatorio, se acumula en el sistema nervioso y crea placas difusas (*arriba*). Luego, la beta-proteína, diferentes células gliales y otras proteínas que se van incorporando en la matriz creciente de la placa, promoverán la degradación de las neuronas adyacentes (*abajo*).

VASO
SANGUINEO
CELULA
SANGUINEA
DENDRITA
ASTROCITO
(CELULA GLIAL)
CELULA DE
LA MICROGLIA
NEURONA
CELULA ENDOTELIAL
BETA-PROTEINA
AMILOIDEA
AXON
PLACA DIFUSA

PLACA MADURA
PROTEINAS
ASOCIADAS
A LA PLACA
AXON EN
DEGENERACION
DENDRITA EN
DEGENERACION

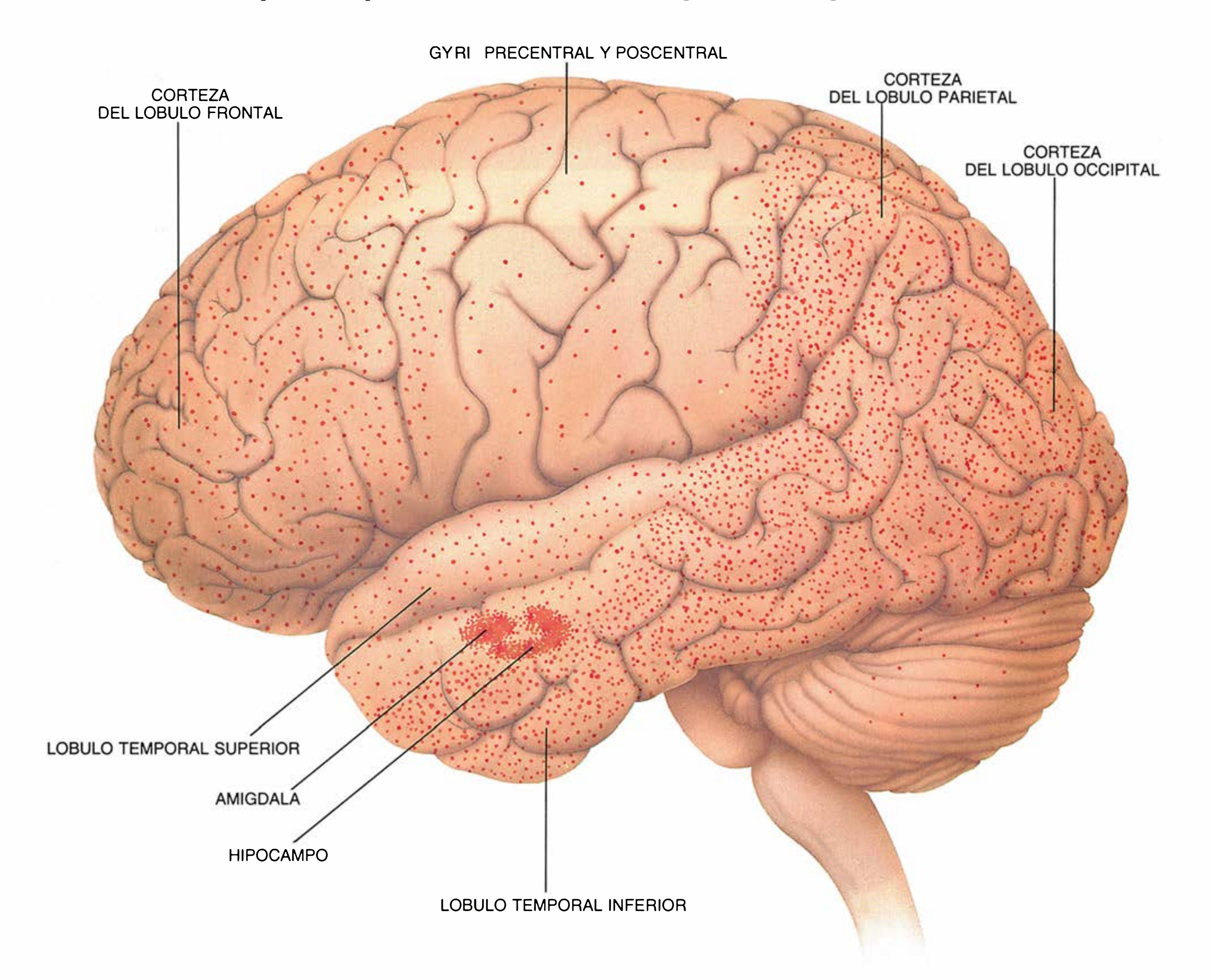
(Las dendritas son terminaciones alargadas y afiladas de las neuronas; se las conoce también por el nombre colectivo de neuritas.) Vistos al microscopio, los filamentos semejan otros depósitos extracelulares que se acumulan en órganos dispares según la enfermedad de que hablemos.

Rudolf Virchow, eminente patólogo alemán, llamó amiloideos a esos depósitos en 1853; no era muy afortunado el calificativo, pues daba a entender que estaban compuestos de alguna sustancia similar al almidón. El análisis químico de los principales constituyentes de los filamentos amiloideos revelaría su naturaleza proteica, proteínas cuya identidad varía en función de la enfermedad en la que se produzca el depósito. Hay un hilo conductor que enhebra a todas esas enfermedades, o distintas formas de amiloidosis si usamos el tecnicismo: todas se caracterizan por la presencia de innumerables depósitos extracelulares de fragmentos proteicos normales o mutados. Además, las subunidades proteicas aparecen siempre plegadas en un patrón tridimensional particular llamado lámina beta-plegada.

La placa senil es una estructura compleja de lenta evolución. Se tarda años, décadas incluso, en constituirse una placa madura. Además del núcleo central de beta-proteína amiloidea y de las neuritas anormales que lo rodean, las placas maduras contienen dos tipos de células gliales alteradas. (Las células de la glía se hallan junto a las neuronas y desarrollan múltiples funciones de apoyo y protección.) En el centro de las placas maduras suele haber células microgliales, carroñeras dispuestas a intervenir en la inflamación o la destrucción del tejido del sistema nervioso en distintos trastornos cerebrales. Merodeando por el exterior de la placa descubrimos la presencia de astrocitos reactivos, células de la glía que suelen aparecer en las zonas lesionadas del cerebro.

Amén de las placas seniles, denuncian el mal de Alzheimer los nódulos neurofibrilares: haces compactos de fibras anormales del citoplasma de ciertas neuronas; el tejido cerebral afectado los presenta en número variable. Estas fibras, o pares de filamentos helicoidales, no son de beta-proteína amiloidea; constan, así parece, de una forma modificada de la proteína neuronal tau. Lo mismo que ocurría con las placas amiloideas, tampoco son exclusivos del Alzheimer los nódulos neurofibrilares. Los vemos en una docena larga de enfermedades crónicas cerebrales.

La mayoría de quienes cumplen los setenta años desarrollan placas seniles y nódulos neurofibrilares, sobre todo en el hipocampo y en otras zonas del cerebro que participan en el proceso de la memoria. En buena medida, la distinción entre el envejecimiento normal del cerebro y la enfermedad de Alzheimer es más cuantitativa que cualitativa. Los pacientes con demencia progresiva del tipo de Alzheimer suelen crear más placas neuríticas maduras y nódulos neurofibrilares que las personas de su misma edad no afecta-



2. CEREBRO DE ENFERMO DE ALZHEIMER con las infinitas placas de beta-proteína amiloidea (señaladas por el punteado) en zonas cerebrales específicas. Estas placas pasan a constituir centros de degradación de las células nerviosas.

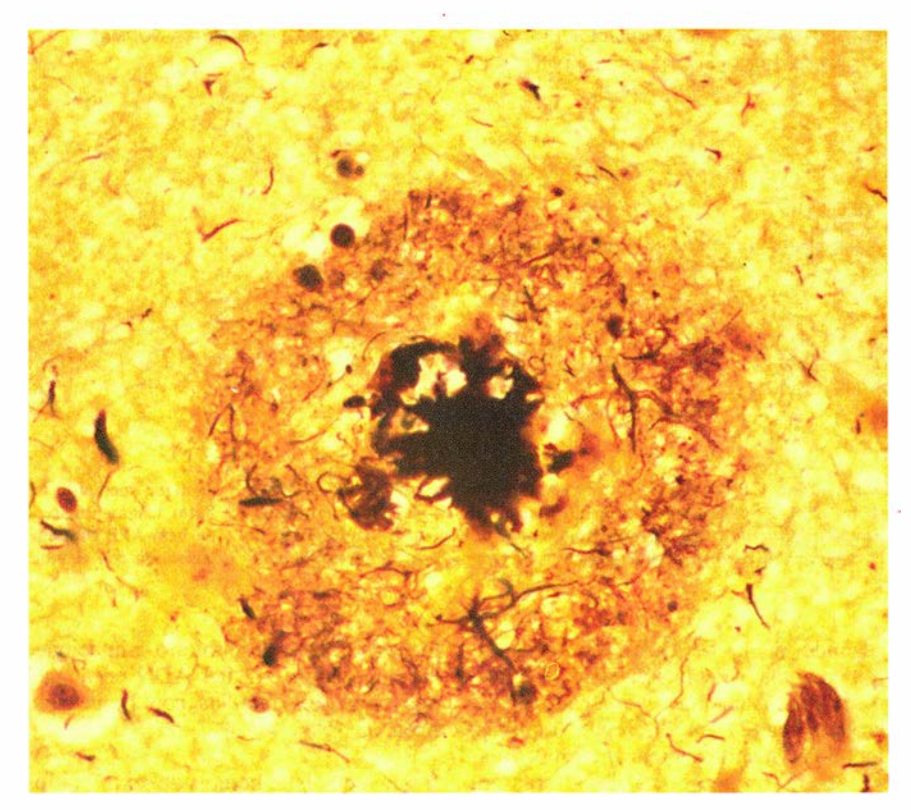
das de demencia senil. El conocimiento de la génesis de las placas y nódulos de la enfermedad de Alzheimer deberá, pues, ayudarnos a comprender el origen de las lesiones muy similares que provocan idénticas alteraciones, aunque menos marcadas, en la memoria y la lucidez de los septuagenarios sanos.

Dado que la presencia copiosa de placas neuríticas amiloideas en las regiones del cerebro esenciales para la función intelectual constituye una nota definidora de la enfermedad de Alzheimer, importa empezar por la naturaleza de la proteína amiloidea. En 1984, George G. Glenner y Caine W. Wong, de la Universidad de San Diego, aislaron la sustancia amiloidea de los vasos sanguíneos de las meninges (el tejido conjuntivo que rodea el cerebro) de pacientes con Alzheimer. Cuando disolvieron el amiloide aislado, observaron que lo componía una pequeña proteína, la "beta-proteína", dotada de una secuencia especial de aminoácidos.

Poco tiempo después, los equipos de Colin L. Masters y de Konrad Beyreuther, aquél en la Universidad de Australia Occidental y éste en la de Colonia, aislaron los núcleos amiloideos de placas seniles. La proteína del núcleo tenía el mismo tamaño y la misma composición en aminoácidos que la beta-proteína meningovascular; los anticuerpos que reaccionaban contra una lo hacían contra la otra.

Ahora bien, por aquellas mismas fechas, las placas del núcleo (o matriz) que aislaron Carmela y el autor portaban una beta-proteína cuyo primer aminoácido "se hallaba bloqueado", lo que significaba que no podíamos descifrar su secuencia; ello contrastaba con lo ocurrido con la beta-proteína obtenida de los vasos sanguíneos, secuenciada con éxito por Glenner y Wong. Esa y otras observaciones nos movieron a pensar que la placa madura de la matriz contenía beta-proteína cuya estructura química, comparada con la descubierta en los vasos, estaba modificada. Diríase, pues, que ambos, el amiloide vascular y el de la placa, eran de beta-proteína, aunque difería ligeramente, de uno a otro, la forma química exacta del compuesto.

Purificada y secuenciada, para acabar de caracterizar la proteína hay que proceder al clonaje de la molécula de ADN complementario que incluye el código genético determinante de su síntesis. En el caso de la beta-proteína amiloidea, cuatro laboratorios lo consiguieron, independientemente, a principios de 1987. El equipo de Jin Kang, Beyreuther y Benno Müller-Hill, de la Universidad de Colonia, acertaron en aislar un segmento de ADN que contenía la secuencia completa del código de la proteína, secuencia que demostraba que la beta-proteína amiloidea era un breve polipéptido, de unos 40 aminoácidos, de una proteína de 695 aminoácidos; a esta última se la conoce hoy como beta-proteína amiloidea precursora (beta-APP).



3. PLACA DE BETA-PROTEINA AMILOIDEA en el cerebro de un paciente de la enfermedad de Alzheimer: se trata de la masa globular negra de este corte teñido. La placa se encuentra rodeada por un círculo de neuritas (axones y dendritas) anormales y por somas celulares en degeneración que aparecen más oscuros que las neuronas normales.

La presumible estructura de la beta-APP abarcaba una región (entre el aminoácido 625 y el 648) que facilitaba el anclaje de la molécula en las membranas celulares. Para sorpresa de todos, el corto fragmento de la beta-proteína amiloidea contenía los aminoácidos 597 a 636: 28 aminoácidos fuera de la membrana celular y los 12 primeros en el interior de la misma. Este hallazgo planteaba un problema que todavía no ha sido resuelto: ¿cómo puede un segmento de la beta-APP, que suele aferrarse con firmeza a las membranas celulares, aparecer en el espacio extracelular como sustancia amiloidea? Dicho en otros términos: ¿cómo pueden las enzimas que cortan, de su precursor, la beta-proteína amiloidea transcender la región de la membrana? La respuesta podría aprovecharse quizá para bloquear la amiloidosis del Alzheimer.

No menos interesante que el conocimiento de la estructura aminoacídica del precursor amiloideo fue el descubrimiento, por parte de los cuatro laboratorios que clonaron la beta-APP, de que un gen localizado en el cromosoma 21 era el que codificaba el precursor. Este hallazgo despejó algunas incógnitas del Alzheimer. Entendíase ahora por qué las personas con síndrome de Down, que nacen con un ejemplar más del cromosoma 21, suelen desarrollar depósitos beta-amiloideos a una edad bastante precoz. Por la misma época, un grupo dirigido por Peter St. George-Hyslop, Rudolph Tanzi y James F. Gusella, del Hospital General de Massachusetts, descubrieron que por lo menos una forma familiar de la enfermedad de Alzheimer (EAF) dependía de un defecto genético localizado también en el cromosoma 21.

Parecía, a primera vista, que el gen de la beta-APP fuera único responsable de la EAF precoz. Pero, como suele ocurrir en la ciencia, la situación resultó ser más compleja. Los estudios acometidos con pacientes de EAF, entre finales de 1987 y principios de 1988, no descubrieron defectos o duplicaciones en la región codificante de proteína del gen de la beta-APP; además, entre el gen de la beta-APP y el sitio aproximado del defecto EAF de manifestación precoz (del cromosoma 21), mediaba un segmento largo de ADN. A mayor abundamiento, los equipos de Gerard D. Schellenberg y Margaret A. Pericak-Vance, el primero de la Universidad de Washington y el

ESTRUCTURA DE LA MOLECULA PRECURSORA

REGION REGULADORA DE LA PROTEASA

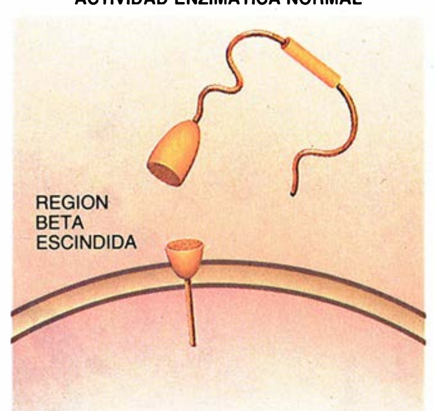
REGION BETA-AMILOIDEA

TERMINAL AMINO

MEMBRANA

TERMINAL CARBOXILO

ACTIVIDAD ENZIMATICA NORMAL



ACTIVIDAD ENZIMATICA ALTERNATIVA



4. PROTEINA PRECURSORA DE LA PROTEINA BETA-AMILOIDEA (beta-APP). Esta molécula de membrana admite varias vías de metabolización (*izquierda*). Las enzimas fragmentan la beta-APP por la mitad de la región beta (*centro*); pero a veces liberan fragmentos completos de beta-proteína mediante la intervención sobre uno de sus extremos (*derecha*). Estos fragmentos se segregan y acumulan en los tejidos. Algunas formas de beta-APP contienen un regulador de la proteasa que podría estar relacionado con el funcionamiento normal de la proteína.

segundo de la de Duke, no encontraron ninguna vinculación entre la enfermedad de Alzheimer y marcadores del cromosoma 21 en diferentes familias, incluidas manifestaciones tardías (mayores de 65 años) de la alteración. Esos trabajos y otros del mismo tenor inducen a concluir la naturaleza genética heterogénea de la EAF; puede originarse a partir de diferentes defectos genéticos de cromosomas distintos.

No debería sorprendernos haber llegado a esa conclusión. La enfermedad de Alzheimer es muy frecuente, afecta a muchos grupos étnicos y remeda el proceso normal de envejecimiento del cerebro. Es, pues, razonable que el síndrome al que llamamos enfermedad de Alzheimer aparezca con distintas formas a partir de diferentes alteraciones genéticas. Sin embargo, todas estas alteraciones parecen actuar mediante un mecanismo común que implica el aumento del depósito de beta-proteína amiloidea.

El grupo de Alison Goate y John Hardy, del londinense Hospital St. Mary, acaba de dar un paso adelante en la investigación de los genes que producen la EAF, a raíz del descubrimiento de cierto patrón nucleotídico en el gen beta-APP en todos los miembros de dos familias que padecían la enfermedad de Alzheimer. Cuando secuenciaron el ADN codificador de la región de la beta-proteína amiloidea dentro de la beta-APP, hallaron una mutación: el aminoácido 642 (de un total de 695) era una valina, no la acostumbrada isoleucina. No se había encontrado, hasta entonces, ninguna mutación en el gen de la beta-APP de sujetos con la EAF ni en sujetos sanos; cabe pensar, así, que no se trata de una casualidad irrelevante, sino que el cambio provoca la aparición de la enfermedad de Alzheimer en estas dos familias. En los últimos meses se han descubierto mutaciones en la posición 642 del ADN en al menos otras seis familias con propensión hacia la EAF.

De todo esto hemos de extraer dos conclusiones importantes. Primera: se ha identificado una causa molecular específica para la enfermedad de Alzheimer. Segunda: resulta evidente que la deposición beta-amiloidea puede originarse directamente de una mutación en la beta-APP, sin la presencia de otras alteraciones celulares o moleculares preexistentes. Una idea que algunos habíamos defendido desde tiempo atrás —las anomalías beta-amiloideas pueden provocar ciertas formas de la enfermedad de Alzheimer— ha pasado del terreno de la especulación al de la confirmación.

Algunos casos de Alzheimer se presentan de manera esporádica, es decir, sin que haya relación conocida con ningún tipo de predisposición familiar. Pero no es fácil confirmar ese extremo cuando la enfermedad se manifiesta en edad avanzada, porque los familiares que pudieran haberla contraído genéticamente quizás hayan muerto, por otras causas, antes de que afloraran los síntomas. Entra en lo viable que la aparición de la enfermedad de Alzheimer venga condicionada por factores ambientales. Así lo corroboran los gemelos idénticos que evidencian los primeros síntomas a edades muy dispares. Pero la búsqueda de los factores ambientales que disparan el comienzo de la enfermedad ha resultado infructuosa, aunque el debate continúa y se centra en la importancia del aluminio. En una pequeña minoría de pacientes el factor externo ha consistido en un trauma craneal grave, aunque se desconoce en virtud de qué mecanismos el traumatismo podría acelerar la deposición beta-amiloidea.

Mientras avanzaban las investigaciones sobre los defectos genéticos que subyacían bajo la forma común de enfermedad de Alzheimer, se progresaba también en la determinación de beta-APP y en la misión desempeñada por la beta-proteína en el desarrollo de la enfermedad. El trabajo molecular de diversos laboratorios ha descubierto secuencias alternativas de ADN que codifican la beta-APP; estas secuencias contienen o uno o dos segmentos codificadores adicionales en la posición 289 de la serie original de 695 aminoácidos. De esas dos inserciones, una codifica el segmento de aminoácidos que se engarza a las proteasas (enzimas que fragmentan las proteínas), para bloquearlas. Gracias a ese descubrimiento podemos atribuir una función normal para la beta-APP: podría tratarse de una molécula inhibidora que regulase la actividad de las proteasas.

El trabajo químico realizado en Harvard por el autor, junto con Marcia Podlisny, y en colaboración con Tilman Oltersdorf y Lawrence C. Fritz, de Athena Neurosciences en San Francisco, acabó con la identificación y caracterización de la beta-APP de varios tejidos, cerebral incluido, y de células en cultivo. En todos los tejidos estudiados nos salió un fragmento estable de la beta-APP que contenía un extremo de la molécula (el terminal carboxilo) y parte o toda la región crítica de la beta-proteína amiloidea. Otros laboratorios demostrarían, más tarde, que el extremo complementario de la beta-APP, la zona del terminal amino, se excreta al líquido del espacio extracelular (y, por ende, al líquido cefalorraquídeo y al plasma). En 1990, Fred Esch y sus colaboradores, de Athena Neurosciences, observaron que esta fragmentación habitual de la beta-APP era el resultado de la parti-

ción del precursor por el aminoácido 16, dentro de la región de la beta-proteína amiloidea.

Este hallazgo nos está diciendo que la proteasa, hasta ahora sin identificar y que escinde esa región, evita la formación cabal de beta-proteína amiloidea. Por consiguiente, la deposición beta-amiloidea que acontece en el envejecimiento y en la enfermedad de Alzheimer deberá relacionarse con una vía proteolítica alternativa: vía que escinda la beta-APP al principio y al final de la región de la beta-proteína amiloidea. La investigación trabaja en busca de tales proteasas, ya que es de suponer que los fármacos que inhiban su actividad disminuirán o evitarán la deposición de beta-proteína amiloidea.

Hemos hecho hincapié en la comprensión de los procesos normales y anormales relacionados con la beta-APP. Mas, ¿con qué pruebas contamos para afirmar que la deposición de beta-proteína amiloidea precede a la enfermedad de Alzheimer y no es su consecuencia? Desde principios de siglo, los neuropatólogos han venido discutiendo si las neuritas de la placa periférica producían el amiloide de la matriz de la placa senil al par que iban degenerando o si, por el contrario, su aparición precedía al desgaste de las neuritas y era su causa. Algunos se preguntaban si el amiloide procedía de las neuronas sanas, de las células gliales o, incluso, de los vasos sanguíneos adyacentes.

En 1988 y 1989 se observó que en el tejido cerebral de los enfermos de Alzheimer aparecían depósitos amorfos y no filamentosos de beta-proteína amiloidea; estas placas difusas, o "preamiloideas", abundaban mucho más que las clásicas placas neuríticas. Utilizando anticuerpos específicos para la beta-proteína amiloidea, lo que es una prueba de gran sensibilidad, se detectó la presencia de estas placas difusas no sólo en las áreas del cerebro relacionadas con la sintomatología que acompaña a la enfermedad (corteza cerebral), sino también en otras zonas (tálamo y cerebelo). Y lo llamativo: la mayoría de los depósitos difusos de beta-proteína apenas contenían neuritas degradadas o células reactivas de la glía. Las observaciones con microscopio electrónico llevadas a cabo por Haruyasu Yamaguchi, de la japonesa Universidad de Gunma, han revelado que buena parte del tejido confinado en la placa difusa no se distingue del adyacente tejido cerebral normal.

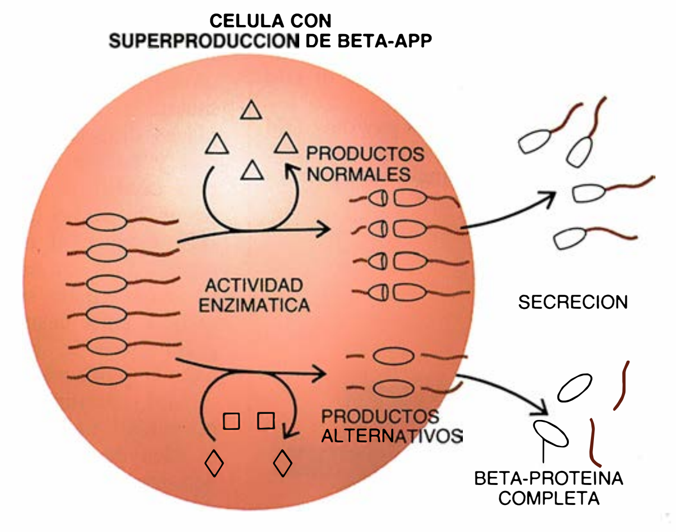
Varios laboratorios han dado a conocer cómo determinados pacientes con síndrome de Down, muertos en la segunda o tercera década de su vida, presentan muchas placas difusas en vez de placas neuríticas maduras, nódulos neurofibrilares u otros signos de patología celular. Ahora bien, la inmensa mayoría de tales individuos hubieran desarrollado, a la larga, lesiones maduras; por tanto, cabe afirmar que los depósitos difusos de beta-proteína amiloidea preceden a la neuropatología de Alzheimer que acompaña al síndrome de Down y, por implicación, a la propia enfermedad de Alzheimer. Es probable que sólo una minoría de los depósitos difusos de beta-proteína evolucionen de forma progresiva hasta afectar a las neuritas y la glía adyacente. Por razones que ignoramos, esta maduración parece tener lugar con mucha mayor frecuencia en la zona de la corteza cerebral, causante de los síntomas, que en el cerebelo.

La observación de placas difusas sugiere que la deposición de beta-proteína amiloidea precede a la degradación de las neuronas y de otras células del cerebro. Estos datos, sumados a la presencia de beta-proteína amiloidea en las paredes de los vasos sanguíneos de las meninges fuera del tejido cerebral, me movieron, con mis colaboradores Catharine L. Joachim e Hiroshi Mori, a buscar depósitos de beta-proteína amiloidea en otros órganos diferentes del cerebro. A principios de 1989, encontramos pequeños acúmulos en el interior y alrededor de ciertos vasos sanguíneos de la piel, del intestino y otros tejidos de pacientes con Alzheimer, así como en ancianos que se incluyeron como controles. Estos depósitos reaccionaban específicamente con anticuerpos contra la beta-proteína amiloidea.

La detección de estos depósitos respaldaba la idea según la cual el proceso que subyace bajo la acumulación beta-amiloidea que se registra en la enfermedad de Alzheimer no estaría restringido al cerebro. La predilección de estos depósitos extracerebrales por las zonas adyacentes a los vasos sanguíneos refuerza el paralelismo entre la enfermedad de Alzheimer y ciertas amiloidosis sistémicas de origen circulatorio. Y lo más importante, la acumulación de pequeñas cantidades de beta-proteína amiloidea en los vasos periféricos sin que se haya producido ninguna lesión neuronal precedente —en realidad, sin neuronas locales y células gliales— consolida la hipótesis que defiende la relación de precedencia de la liberación y acúmulo de beta-proteína amiloidea con respecto a la degeneración neuronal en el cerebro; no se trata, pues, de su consecuencia.

Algunas de las pruebas más claras de que los depósitos de beta-proteína amiloidea constituyen el episodio desencadenante de la enfermedad se fundan en las investigaciones sobre una

CELULA QUE PRODUCE UNA CANTIDAD NORMAL DE BETA-APP
ENZIMA A
BETA-APP
PRODUCTOS NORMALES
ACTIVIDAD ENZIMATICA
SECRECION
ENZIMA B
ENZIMA C



5. SUPERPRODUCCION DE BETA-APP para intensificar la liberación del fragmento beta-amiloideo. Normalmente, sólo las enzimas que actúan en la región beta-amiloidea reaccionarán con la beta-APP (*izquierda*). Pero ante una situación de exceso de beta-APP, operan otras enzimas que liberan el fragmento beta-amiloideo (*derecha*). Este mecanismo podría explicar lo que sucede en los enfermos con el síndrome de Down.

rara alteración genética, descrita en dos ciudades de Holanda. Los enfermos de las familias afectadas morían en el meridiano de la vida por hemorragias cerebrales producidas por la presencia de abundantes depósitos amiloideos en inumerables vasos sanguíneos; de ahí el nombre de "hemorragia cerebral hereditaria con amiloidosis de tipo holandés" (HCHA-holandesa). El equipo de Blas Frangione, de la Universidad de Leiden y del Hospital Clínico de la Universidad de Nueva York, descubrieron que la proteína que se acumulaba en esa enfermedad era la beta-proteína amiloidea.

Poco después, en 1990, los equipos de Efrat Levy y Frangione, de la Universidad de Nueva York, Mark Carman, de Athena Neurosciences, y Sjoerd van Duinen, de la Universidad de Leiden, descubrieron una mutación nucleotídica en el gen de beta-APP, en virtud de la cual se sustituía el aminoácido glutamina por ácido glutámico en la posición 22, dentro de la beta-proteína amiloidea. No es fácil explicar que esa sola mutación produzca los peligrosos depósitos cerebrovasculares. Pero el trabajo del grupo encabezado por Christine Van Broeckhoven, de la Universidad de Amberes, que abordó el análisis genético de familiares afectados y sin afectar, confirmó que la mutación era el defecto causante de la enfermedad.

Los pacientes estudiados mostraban también abundantes depósitos de beta-proteína en la corteza cerebral, muy similares a las placas preamiloideas de la enfermedad de Alzheimer y del síndrome de Down. Por razones desconocidas, estas acumulaciones no parecen afectar a las neuritas y a la glía adyacentes: ni se ven nódulos neurofibrilares ni otras alteraciones neuronales; además, los pacientes no manifiestan los síntomas de la demencia de Alzheimer. En cualquier caso, la caracterización de la HCHA-holandesa permite corroborar que basta una mutación en la beta-APP para producir placas difusas de beta-proteína amiloidea y beta-amiloidosis cerebral. Todo ello constituye un excelente ejemplo de un principio básico en la investigación médica: el estudio de una enfermedad rara en un pequeño grupo de pacientes puede suministrar claves decisivas para desentrañar los procesos patológicos habituales que afectan a toda la población.

Aun cuando admitamos que esta pluralidad de observaciones respaldan la idea de una deposición precoz de beta-proteína amiloidea en la enfermedad de Alzheimer, ¿qué pruebas reales tenemos de que el polipéptido sea biológicamente activo? Debe determinarse si la beta-proteína amiloidea es, por sí misma, lesiva para las neuronas o si se limita a servir de matriz en la que se engarzan otras moléculas más activas. Por el momento, sólo tenemos algunos datos aislados acerca de los efectos biológicos de la beta-proteína amiloidea. En 1988, Janet S. Whitson y Carl W. Cotman, de la Universidad de California en Irvine, en colaboración con el autor, observaron que los 28 primeros aminoácidos de la beta-proteína amiloidea ejercían efectos tróficos (promotores de la supervivencia) en cultivos de neuronas del hipocampo de ratas. Poco después, el grupo de Cotman demostró que la molécula entera de beta-proteína, sin partir, poseía lo mismo efectos tróficos sobre las neuritas que neurotóxicos.

Más recientemente, Bruce A. Yankner y sus colaboradores, del Hospital Infantil de Boston, daban cuenta del fenómeno siguiente: en condiciones adecuadas, dosis limitadas de beta-proteína amiloidea sin fraccionar fomentaban la supervivencia de neuronas de rata frescas en cultivo. Ahora bien, cuando se les elevaba la dosis, y se dejaba envejecer el cultivo durante cuatro días, se percibían los efectos tóxicos en algunas neuronas. Yankner localizó tales efectos biológicos en un segmento de la beta-proteína amiloidea (entre los aminoácidos 25 y 35). La secuencia de aminoácidos de esta región molecular es muy similar a la de la sustancia P, péptido que se sintetiza de manera natural en el cerebro. Si el efecto neurotóxico observado en el estudio de Yankner se confirma, la hipótesis de que la beta-proteína amiloidea es directa responsable de la patología neuronal que se observa en las placas neuríticas recibirá un sólido apoyo.

Carecemos de un modelo animal adecuado para la enfermedad de Alzheimer. Esa limitación constituye un serio obstáculo a la hora de descifrar los mecanismos que permiten la liberación de la beta-proteína a partir de su precursor, degradan neuronas y producen cambios en las células de la glía. Los conejillos de Indias habituales no desarrollan espontáneamente, en su envejecimiento, los depósitos amiloideos cerebrales; sí lo hacen, por contra, los primates, muy caros en otro sentido. En 1987, el equipo del autor y el dirigido, en la Universidad Johns Hopkins, por Linda Cork y Donald Price demostraron que los anticuerpos sintetizados contra beta-proteína humana purificada reaccionaban vigorosamente con el amiloide presente en placas seniles y vasos sanguíneos de monos, perros y otros mamíferos de edad avanzada. En estudios

complementarios, realizados en el laboratorio de Price y en el mío, se evidenció que los monos padecían una beta-amiloidosis asociada al envejecimiento, sorprendentemente similar a la de los seres humanos. Cuando se desarrollen fármacos que bloqueen la síntesis o la acción de la beta-proteína, podremos valorar primero su eficacia e inocuidad en los primates.

De momento se trabaja en un modelo animal más práctico mediante la inyección de fragmentos de ADN humano en ovocitos fecundados de ratón. Varios laboratorios crían e investigan ya con ratones transgénicos que incorporan, en su genoma, parte del gen humano determinante de la beta-APP. En el experimento abordado por el equipo de Barbara Cornell, del Centro de Biotecnología de California, el ratón transgénico que habían preparado para el caso presentaba depósitos de beta-proteína con ciertos rasgos peculiares de las placas difusas. No se sabe aún si esos acúmulos degradarán las neuronas y células gliales circundantes con alteraciones análogas a las que se observan en la enfermedad de Alzheimer. Convendrá, sobre todo, disponer de cepas de ratones transgénicos con las moléculas mutantes de beta-APP para estudiar la formación de depósitos de beta-proteína y su inhibición por fármacos.

¿Cómo vertebrar conocimientos tan copiosos y dispares, sobre la naturaleza y efectos de la beta-proteína amiloidea y de su precursor, en un modelo que explique los mecanismos subyacentes bajo la enfermedad de Alzheimer, o al menos de algunas de sus formas? Desde mi punto de vista, una gavilla de defectos del cromosoma 21 relacionados entre sí, a pesar de las diferencias, promueven la aparición de proteínas de beta-APP de estructura anómala o desarbolan el control de la transcripción del gen de la beta-APP; entre esos factores negativos numero las mutaciones, deleciones y quizá reordenaciones del ADN.

En familias que sufren el último tipo de defecto mencionado, el nuevo ADN controla, a buen seguro, cuánto ARN mensajero debe transcribirse a partir del gen de la beta-APP o qué forma del mismo. (El ARN mensajero constituye una molécula intermediaria decisiva en la traducción de los genes en proteínas.) El control de la transcripción génica es un proceso muy complejo; además, no conocemos bien los elementos reguladores presentes en el gen de la beta-APP. Pensemos, por ejemplo, en la alteración del ADN del cromosoma 21 que produce ciertas formas de EAF: ¿se relaciona con el ADN de las regiones reguladoras del gen de la beta-APP para degradar al individuo? Pero cabría también que la mutación se diera en una de las regiones reguladoras. En nuestro primer guión (modelo I), el efecto último de las modificaciones que experimente el ADN fuera de la región proteica codificadora del gen de la beta-APP consiste en potenciar —unas veces moderada, otras notablemente— la cuantía o clase de proteínas beta-APP sintetizadas al menos en algunos tipos celulares. De lo que podría resultar una superproducción de beta-APP, similar, hasta cierto punto, a la que acontece en el síndrome de Down (si bien aquí se explica por la copia supernumeraria del gen de la beta-APP).

Se desconoce la identidad de los tipos celulares productores de moléculas de beta-APP que liberan el polipéptido. Entre los candidatos más firmes consignaría las células que circulan por la sangre (plaquetas, por ejemplo) y las células endoteliales que tapizan las paredes vasculares, sin desechar las neuronas y las células de la glía. Si estas células sintetizaran beta-APP en exceso o en formas agresivas, algunas moléculas podrían metabolizarse a través de una vía enzimática alternativa, liberándose por tanto fragmentos que contuvieran la beta-proteína amiloidea.

Con el tiempo, las proteasas dividirían nuevamente estos fragmentos para liberar la beta-proteína amiloidea completa, que a continuación se acumularía en el espacio extracelular del cerebro y constituiría las placas difusas. Por la acción de los factores tisulares locales de la corteza cerebral y de otras regiones del cerebro que intervienen en las funciones cognitivas, una fracción de estas placas difusas se irían haciendo cada vez más filamentosas y compactas. La adición de las llamadas proteínas beta-amiloideas asociadas —algunas de las cuales ya se han identificado— y la activación de la microglía y de los astrocitos adyacentes probablemente contribuirían también a la maduración de las placas.

En algún punto de este proceso dinámico, la proteína beta-amiloidea u otras moléculas atraídas por ella empezarían a ejercer efectos tróficos y tóxicos sobre los axones y dendritas adyacentes, produciéndose algunas placas neuríticas. Con toda probabilidad, en esta fase ocurrirían muchos otros cambios bioquímicos y estructurales; por ejemplo, pérdida de sinapsis con la caída consiguiente de los niveles corticales de acetilcolina y otros neurotransmisores. Algunas de las neuronas afectadas producirían las masas de filamentos dobles helicoidales que constituyen los nódulos neurofibrilares. El cumplimiento de esa compleja y pro-



6. DEPOSITOS AMARILLENTOS con beta-proteína amiloidea en una tinción de vasos sanguíneos. La presencia del polipéptido en el sistema vascular mueve a pensar que la proteína amiloidea que se acumula en el cerebro podría proceder del torrente circulatorio.

gresiva cascada de alteraciones moleculares en hipocampo y corteza cerebral se traduciría en la lenta manifestación de los síntomas que vemos asociados a la degradación racional del paciente.

Los mecanismos de la enfermedad que hemos propuesto pecan de obligada simplificación y sesgo especulativo. Hay fenómenos que no encajan en este guión teórico. El principal reto que plantea la enfermedad de Alzheimer —y fuente primera de controversias— yace en la ordenación de los cambios bioquímicos observados en una secuencia temporal de patogénesis. Al exponer nuestro modelo teórico, en particular de las formas comunes del Alzheimer, hemos destacado las alteraciones de la regulación de la síntesis de la beta-APP. La forma de EAF asociada al cromosoma 21 guarda un sorprendente parecido con el síndrome de Down, en el que la producción excesiva de beta-APP es un hecho, no una hipótesis.

Pero podría haber, por debajo de ciertos casos de la enfermedad de Alzheimer, fallos del metabolismo y degradación de la beta-APP. En este contexto, determinadas alteraciones genéticas podrían modificar las enzimas que catalizan la unión de las moléculas de carbohidrato o fosfato a las moléculas de beta-APP, o podrían degradar las proteasas que intervienen en el metabolismo de beta-APP. En tales episodios, el gen que codificaría la enzima defectuosa podría pertenecer a cualquier cromosoma, no forzosamente al número 21. Si bien no se ha implicado, de momento, a ningún otro cromosoma en la génesis de la EAF, el equipo encabezado por Allen D. Roses, del Hospital Clínico de la Universidad de Duke, aventura la posibilidad de que, en algunas familias, sí se relacione el mal con el cromosoma 19.

Además de la búsqueda de las alteraciones genéticas que están detrás de las diversas formas de EAF, importa realizar estudios epidemiológicos que permitan descubrir los factores ambientales que predisponen a padecer la enfermedad de Alzheimer o que aceleran su evolución. No hay pruebas suficientes para establecer una relación segura entre alimentación, nivel de estudios, ocupación, estado emocional u otros factores imaginables con la aparición o la progresión de la enfermedad.

El objetivo último de la investigación es, por supuesto, dar con una terapia eficaz. En 1976, tres laboratorios de Gran Bretaña aportaban pruebas del daño sufrido por las neuronas corticales encargadas de la síntesis de acetilcolina. En consonancia con ello, se prestó atención a ese neurotransmisor y se comenzó a administrar fármacos estimuladores de su síntesis; pero no se cosecharon resultados positivos. Sabemos hoy, sin embargo, que la enfermedad de Alzheimer afecta a diferentes tipos de neuronas y neurotransmisores, por cuyo motivo no debe limitarse su tratamiento a la mera reposición de neurotransmisores.

El guión morboso que hemos diseñado apunta hacia nuevas posibilidades terapéuticas que se actuarían en los pasos cruciales de la progresión molecular. Así, podría empezarse por bloquear la liberación en el cerebelo y su red vascular de las moléculas de beta-APP responsables de los depósitos amiloideos. Vía que se presume viable si, como suponemos, esas proteínas llegan a través del torrente circulatorio. Podríamos, también, desactivar las proteasas que liberan la beta-proteína amiloidea al fragmentar la beta-APP. En tercer lugar, podría pensarse en retrasar la transformación de los depósitos de beta-proteína amiloidea en placas neuríticas impidiendo la formación de filamentos amiloideos que acompaña a esa maduración. Cabría oponerse, en cuarto lugar, a la acción de la microglía, los astrocitos y las otras células que contribuyen a la inflamación crónica alrededor de las placas neuríticas. Y en quinto lugar, bloquear las moléculas de la superficie de las neuronas que mediatizan los efectos tróficos y tóxicos de la beta-proteína amiloidea y de las proteínas asociadas con estos procesos en las placas.

No hay un camino de rosas que lleve a la realización de cualquiera de esas posibilidades farmacológicas, pero el número de investigadores que trabajan sobre la beta-amiloidosis y el avanzado estado de nuestros conocimientos hacen prever que, en los próximos años, se descubran inhibidores para uno o varios pasos cruciales en el desarrollo de la enfermedad. A la vista de la tragedia que la enfermedad de Alzheimer representa para sus víctimas y para el conjunto de la sociedad, este logro debiera facilitarse desde todas las instancias.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ALZHEIMER'S DISEASE. R. Katzman en *New England Journal of Medicine*, vol. 314, n.º 15, págs. 964-973; 10 de abril de 1986.

THE PRECURSOR OF ALZHEIMER'S DISEASE AMYLOID A4 PROTEIN RESEMBLES A CELL-SURFACE RECEPTOR. Jin Kang et al. en *Nature*, vol. 325, págs. 733-736; 19 de febrero de 1987.

β-AMILOID PRECURSOR PROTEIN OF ALZHEIMER'S DISEASE OCCURS AS 110- TO 135-KILODALTON MEMBRANE-ASSOCIATED PROTEINS IN NEURAL AND NONNEURAL TISSUES. Dennis J. Selkoe et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 85, págs. 7341-7345; octubre de 1988.

SEGREGATION OF A MISSENSE MUTATION IN THE AMYLOID PRECURSOR PROTEIN GENE WITH FAMILIAL ALZHEIMER'S DISEASE. Alison Goate et al. en *Nature*, vol. 349, págs. 704-706; 21 de febrero de 1991.

THE MOLECULAR PATHOLOGY OF ALZHEIMER'S DISEASE. Dennis J. Selkoe en *Neuron*, vol. 6, págs. 487-498; abril de 1991.

Gary Stix

DAVID A. HUFFMAN: *pulcritud codificada de unos y ceros*

Lo usan las grandes redes de ordenadores IBM, la televisión de alta definición, los moduladores-demoduladores ("modems") y un ingenio electrónico, muy popular, que ahorra el trabajo de pensar cómo programar los reproductores de cintas de vídeo. Todas esas maravillas digitales emplean los resultados del trabajo realizado, hace 40 años, por un modesto doctorando del Instituto de Tecnología de Massachusetts: un sistema de compresión de datos conocido como código de Huffman.

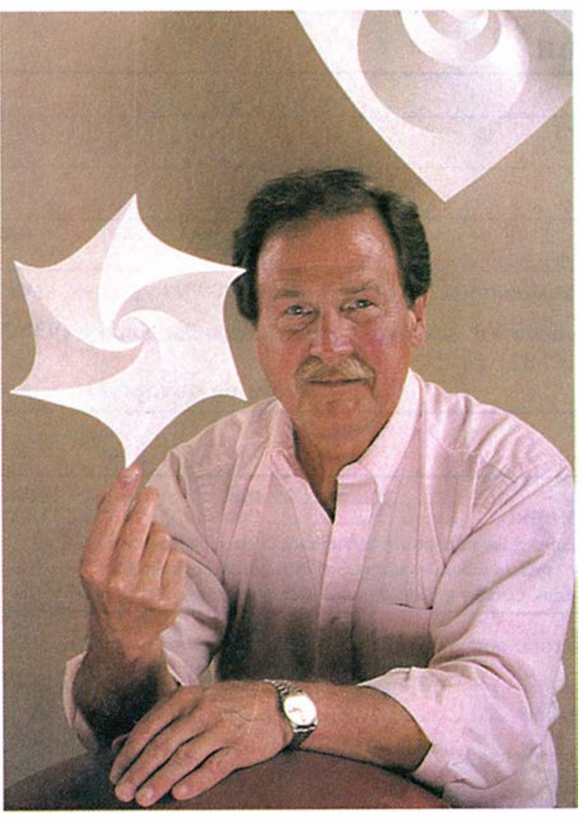
En 1951, se les ofreció a David A. Huffman y sus compañeros de clase la oportunidad de escoger entre presentarse al examen final o realizar un trabajo, para aprobar una asignatura. El problema propuesto por Robert M. Fano, profesor de la clase, parecía a primera vista sencillo: descubrir el método más eficiente de representar letras, números y símbolos usando un código binario. Aparte de constituir un saludable ejercicio intelectual, encontrar ese código permitiría comprimir la información para difundirla por las redes de ordenadores o para almacenarla en una memoria electrónica.

Huffman trabajó en el problema durante meses, ideando distintos enfoques, pero ninguno poseía la propiedad buscada. Cansado de bracear sin rumbo, decidió prepararse para el examen final. Y justo cuando estaba tirando sus notas a la papelera, se le ocurrió la solución. "Fue el momento más singular de mi vida. Se produjo el chispazo de luz que ilumina todos los recovecos de repente".

Con esa epifanía se sumó Huffman a la legión de ingenieros, anónimos en su mayoría, sobre cuyo pensamiento innovador descansa el acervo técnico que define la vida moderna. En su caso, desde el fax a los moduladores-demoduladores y una miríada de aparatos.

No habría osado nunca, confiesa, poner sus manos sobre el problema —y menos cuando tenía 25 años— de haber sabido que Fano, su profesor, y Claude E. Shannon, el creador de la teoría de la información, habían lidiado con él. "Tuve la suerte de encontrarme allí en el momento oportuno y también de que mis profesores no me desanimaran diciéndome que otra gente muy buena ya había luchado con este problema".

Como el morse y otros códigos, el creado por Huffman busca la manera de asignar los códigos más cortos a los caracteres de uso más frecuente, reservando los más largos para los de raro empleo o insólitos. El proceso se llevó a cabo formando un árbol codificador, en el que la probabilidad de que aparezca un número, una letra u otro carácter se representa por una hoja del árbol.



DAVID A. HUFFMAN logra expresar teoremas matemáticos en complejas figurillas de papel.

Las dos probabilidades más bajas se suman para dar una nueva probabilidad. La suma de probabilidades sigue por las ramas del árbol hasta que finalmente los dos números suman 1,0, que forma la raíz del árbol. Cada probabilidad es una hoja, y a cada rama del árbol se le asigna un cero o un uno. Las palabras del código se hallan partiendo de la raíz y encaramándose por las ramas, agregando dígitos binarios por el camino.

Para asignar un código a las letras, una E, a la que podría corresponder una probabilidad de 0,13, se representaría por la cifra 101. Este código de tres cifras se construiría partiendo de la raíz y recorriendo luego tres ramas —etiquetadas con un 1, un 0 y otro 1 respectivamente— hasta llegar a la hoja que corresponde a 0,13. La E recibe un código más corto que la Q, letra que aparece menos veces. Mediante el empleo sistemático de códigos de longitud variable, la idea de Huffman permite reducir a la mitad o incluso más el número de símbolos cifrados que se necesitarían si la longitud de los códigos fuera fija.

Huffman no inventó la idea del árbol codificador. Su genialidad consistió en asignar primero las pobabilidades de los códigos más largos, bajando luego de las ramas a la raíz, llegando siempre a una solución óptima. Fano y Shannon habían intentado resolver el problema en la dirección opuesta, desde la raíz hacia las hojas, un camino menos eficaz. Cuando se encontró con el descubrimiento de su alumno, recuerda Huffman, Fano no pudo menos que exclamar: "¡Así que era eso!".

Los productos que usan el código de Huffman podrían llenar los estantes de un almacén de electrónica. Recientemente ha salido al mercado el VCR Plus+, un aparato que programa automáticamente el reproductor de cintas de vídeo y que está proporcionando pingües beneficios a sus inventores. El usuario no tiene que programar el reproductor de vídeo; se limita a teclear en el pequeño aparato —cabe en la palma de la mano— un número que acompaña a la programación de televisión. Cuando llega el momento de grabar, el ingenio envía sus instrucciones decodificadas al reproductor de vídeo mediante rayos infrarrojos, como los que emplean los mandos de control remoto. Y enciende el aparato, lo programa, escoge el canal y graba durante el tiempo requerido.

Aunque acepta que su fama le viene del código, Huffman se siente más orgulloso de su tesis doctoral, la primera metodología formal para diseñar circuitos conmutadores secuenciales asíncronos, un importante tipo de lógica computacional. La tesis le avaló para que lo contratara el MIT.

Su trabajo atrajo la atención de otros. Durante los años sesenta, William O. Baker, entonces vicepresidente de investigación de los laboratorios de AT&T Bell, le invitó a integrarse en el comité encargado de analizar la futura tecnología de la Agencia Nacional de Seguridad. Puede que lo que atrajera a Baker fuera que el trabajo de Huffman había apuntado un método para convertir una secuencia de números binarios en otra sin perder información, una técnica con obvias aplicaciones en la criptografía.

En 1967 Huffman dejó su puesto de profesor en el MIT para trasladarse a la Universidad de California en Santa Cruz, que lo sedujo con el señuelo de convertirse en el primer jefe del nuevo departamento de ciencia computacional. Este traslado le acercó a las montañas del Oeste, adonde le gusta ir de excursión o de acampada. Ha abandonado la dirección del departamento, pero sigue dando un curso de procesado de señales digitales en la universidad.

Los primeros años de Huffman no auguraban ningún prodigio. Su madre le dijo una vez que empezó a hablar dos años después de lo que acostumbran hacerlo los niños. Atribuye ese retraso a los incidentes familiares que acabaron en el divorcio de sus padres, y que desde entonces ha querido olvidar. Su madre, a quien recuerda con gran afecto, intentó ayudarle empleándose como profesora de matemáticas en una escuela para niños con problemas a fin de que pudiera matricularse allí. Pero al someterlo a las pruebas psicológicas de ingreso se descubrió el motivo de esa reticencia, que había ocultado una mente precoz. A los 18 años obtuvo el título de bachiller en ingeniería eléctrica por la Universidad estatal de Ohio. Se enroló en la Marina, cumpliendo su servicio a bordo de un destructor que ayudó a limpiar de minas las aguas chinas y japonesas tras la Segunda Guerra Mundial.

La imposición de una estructura allí donde no hay se ha convertido en motivo recurrente de su carrera. A principios de los setenta se puso a trabajar sobre ilusiones ópticas, movido por la desazón que le producían las formas aparentemente incongruentes de M. C. Escher, como los famosos triángulos con tres ángulos rectos. La contemplación de las obras de Escher —de quien es ferviente admirador— le llevó a un conjunto de reglas para determinar si la pintura de un artista o una imagen de televisión engañan al representar en dos dimensiones una escena tridimensional.

Huffman determinó un método para poner de manifiesto si los múltiples bordes entre los elementos de una imagen —representados por formas de Y, T o V entre otras— están dispuestos en una estructura coherente. Asocia esas pruebas a una gramática de la imagen. "Quería crear un filtro tal que las imágenes gramaticales lo pudieran atravesar y quedara patente que las no gramaticales son irrealizables", expone. Esta contribución a la joven disciplina del análisis de escenas, que ha sido de utilidad en el desarrollo de sistemas de visión artificial para robots, fue presentado en 1971 en su artículo "Los objetos imposibles como sentencias sin sentido",

Otros trabajos de Huffman van desde el diseño de formas de onda para el radar hasta su última comunicación escrita, aparecida a principios de los ochenta, en la que describía el diseño de un ordenador digital sin necesidad de emplear más que uno de los elementos básicos del álgebra de Boole. Demostraba que una máquina hipotética podía funcionar usando sólo el operador NOT.

Este elemento lógico del álgebra de Boole toma un cero o un uno y lo convierte en su opuesto binario (NOT uno es cero). Huffman puso por título a una de las clases que impartió sobre el tema "Cómo decir que no una sola vez y realmente dejarlo claro".

Desde entonces, Huffman ha dado otro uso al papel: ahora se dedica a la papiroflexia. Quería ver cómo se podían plasmar en estructuras tridimensionales las líneas e intersecciones de las superficies planas que tanto abundaban en su trabajo de análisis de escenas. Sirviéndose de un estilete para repujar las líneas en papel o en delgadas hojas de vinilo, ha modelado espirales, cúpulas y otras formas. Ha impartido clase teóricas y prácticas de papiroflexia en el MIT y Stanford.

Si Huffman estuviera empezando su carrera, seguramente tendría a los agentes de patentes llamando a su puerta. La patente de algoritmos está todavía sujeta a interminables debates judiciales. Pero un abogado moderno le sugeriría a Huffman "vestir" su código con silicio, esto es, producir un pastilla ("microchip") patentable, que tuviera su código programado en la memoria. Pero Huffman ha recibido otra compensación. Los libros de texto de comunicación de datos y otras artes digitales incluyen secciones sobre el código. Y hace poco un viejo amigo le comentó que había visto escrito con H minúscula una referencia a su código. "David, el apostilló, eso prueba que tu nombre acaba de entrar en el lenguaje común."

Ciencia y sociedad

Producción controlada de energía de fusión

El pasado 9 de noviembre, en el dispositivo Tokamak JET instalado en Culham, perteneciente a la Comunidad Económica Europea, y en el curso de los ensayos provisionales con tritio programados, se produjeron, durante dos segundos, dos millones de watts de potencia mediante la fusión controlada de núcleos de deuterio (D) y tritio (T). Era la primera vez que se utilizaba el combustible correcto (D y T) en un experimento de fusión nuclear y la primera vez que se producía energía de fusión en el rango, de interés técnico y comercial, de los millones de watts (megawatts). Quedaba demostrada, no sólo la posibilidad de crear plasmas a temperaturas termonucleares (100 millones de grados Celsius), sino también la de mantenerlos confinados magnéticamente (JET) durante el tiempo mínimo (un segundo) para que las reacciones de fusión produjesen cantidades importantes de energía. Casi setenta años después del descubrimiento de la energía de fusión y su enorme potencial energético, se ha observado la producción controlada de la misma en un laboratorio de plasmas dotado de las condiciones requeridas en un reactor de fusión. Vale la pena enmarcar esos experimentos en el contexto del desarrollo de la fusión nuclear como fuente primaria de energía eléctrica en el futuro.

1. *Importancia de la energía de fusión.* Los núcleos de los átomos más ligeros (hidrógeno y sus isótopos), así como los de los átomos más pesados (uranio), contienen mayor masa media por nucleón que los núcleos de átomos de masa intermedia. Este exceso de masa se convertirá en energía con la unión ("fusión") de núcleos de átomos ligeros o con la partición ("fisión") de núcleos de átomos pesados. Ambas, fusión y fisión, se han desarrollado de forma no controlada para usos militares (bombas de hidrógeno y atómicas). La fisión controlada destinada a fines pacíficos constituye la base de la generación de energía eléctrica en los reactores nucleares.

Pero hasta ese 9 de noviembre no se había conseguido energía de fusión de manera controlada, clase de energía que constituye la mayor reserva para la humanidad. Existe un átomo de deuterio (isótopo del hidrógeno) por cada 6700 átomos de hidrógeno en el agua del mar. El contenido energético de un gramo de D es de 100.000 kilowatts-hora. Sólo con el D que contienen los mares, la fusión nuclear podría suministrar energía para 100 billones de años. Además de utilizar un combustible abundante y barato, la energía de fusión no requiere el almacenamiento de residuos radiactivos de larga vida, los reactores de fusión son intrínsecamente seguros y, por último, no hay que levantar centrales para reprocesar el combutible. En el control, pues, de la fusión de núcleos de átomos ligeros (en principio, los isótopos del hidrógeno D y T) se esconde la solución última al problema del abastecimiento energético: energía abundante, barata, limpia y segura.

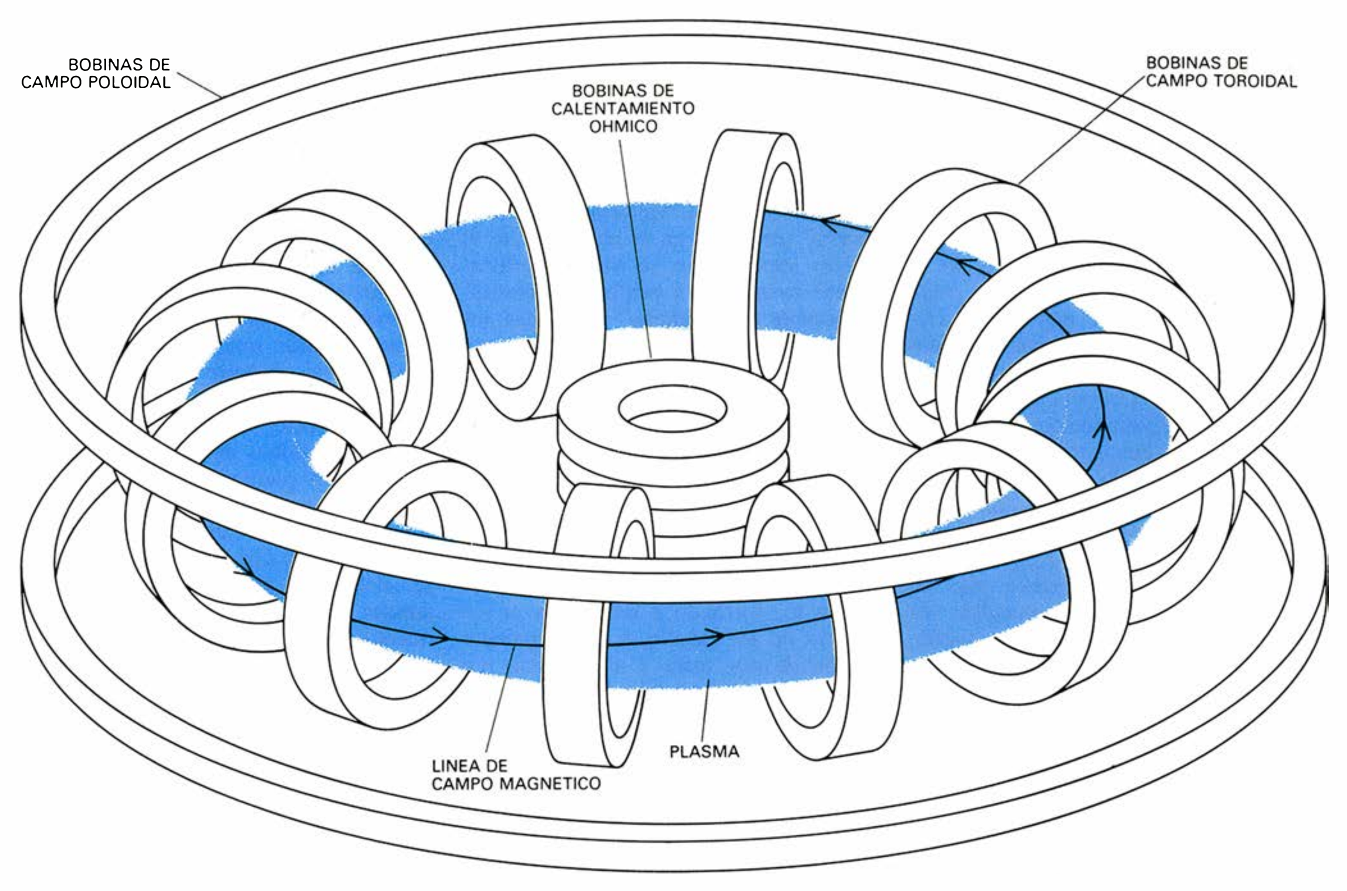
2. *Dificultades en la obtención de energía de fusión.* Para que dos núcleos atómicos se fusionen deben aproximarse a sus distancias nucleares; antes, ha habido que despojarlos de los electrones que les rodean. El gas que forman los elementos combustibles en una reacción de fusión debe estar totalmente ionizado, hallarse en estado de plasma. La transición al estado de plasma se produce a temperaturas del orden de 10.000 grados C. Una vez formado el plasma, los iones resultantes poseen carga positiva; al aproximarse, experimentan la repulsión electrostática de tipo Coulomb; por consiguiente, para poder fusionarse han de poseer una energía cinética suficiente (temperatura) para vencer dicha repulsión. Esta energía cinética mínima de los iones para fusionarse equivale a una temperatura cifrada en unos 100 millones de grados C (plasma a temperatura de fusión).

En 1954 el físico inglés J. D. Lawson fijó un criterio mínimo para que un reactor de fusión tuviese un balance neto de energía. El criterio de Lawson exige la presencia de un número mínimo de núcleos reactantes (densidad), calentados a la temperatura mínima de fusión y confinados un cierto tiempo en el reactor de fusión para que la energía producida por el plasma mantenga el plasma en reacción (encendido) y funcione el reactor en régimen estacionario con producción neta de energía. El producto de estas tres cantidades (densidad, temperatura y tiempo de confinamiento de la energía) debe alcanzar un valor mínimo de 5×10^{21} partículas m^{-3} s KeV (1KeV = 11.000 grados C). Este factor sólo debe ser cinco veces menor si se quiere obtener un balance unitario de energía: energía producida igual a energía gastada (Q = 1 o condición de "ajuste de balance"). El conseguir hacer experimentos controlados de Q = 1 equivale a a demostrar la viabilidad de la fusión nuclear controlada.

3. *Década de la fusión controlada.* Corresponde al último decenio y en ella se crean los grandes Tokamaks. La investigación en fusión nuclear se ha caracterizado históricamente por optimizar cada uno de los tres parámetros anteriores en diversos dispositivos de confinamiento de un plasma termonuclear. Hay dos formas de confinamiento de un plasma de fusión que marchan en cabeza de la investigación: a) confinamiento de un plasma termonuclear en tiempos largos mediante la utilización de campos magnéticos; b) confinamiento inercial de plasmas ultradensos en tiempos muy cortos mediante láseres o haces de iones de potencia. Dentro de la primera línea el concepto más avanzado es el conocido con el nombre Tokamak.

Durante la década de los setenta y debido a las crisis energéticas de 1973 y 1979, se decide la construcción de los denominados "grandes Tokamaks" con el fin de estudiar plasmas en condiciones similares a las requeridas en un reactor de fusión. En su última fase (principio de los años noventa) estas máquinas podrían llevar a cabo experimentos controlados de D-T en condiciones próximas al "ajuste de balance": igualdad entre la potencia producida por fusión y la potencia inyectada para mantener la temperatura del plasma, demostrándose con ello la viabilidad técnica de la fusión. Se construyeron cuatro Tokamaks grandes: TFTR (Princeton, USA), JT-60 (Japón), T-15 (URSS) y JET (Culham, CEE). Dichos Tokamaks empezaron a funcionar en 1982 y 1983.

Durante la 13 Conferencia Internacional de Física del Plasma y Fusión Controlada en Washington, celebrada en noviembre de 1990, el JET presentaba los resultados obtenidos en plasmas de D-D cuya extrapolación a plasmas de D-T estaba cerca del valor de Q = 1. Los parámetros de un plasma termonuclear de fusión se habían conseguido individualmente en los Tokamaks. Dichos parámetros, obtenidos de manera simultánea y en un mismo dispositivo (JET), estaban a un factor de 1,2 de las condiciones de Q = 1 y a sólo un factor 5,6 de las condiciones de un plasma en un reactor de fusión. La conclusión general es que, habiéndose conseguido en el JET plasmas en condiciones próximas a la viabilidad técnica, el programa de fusión debería concentrarse en la factibilidad tecnológica de un reactor experimental de de-



1. TOKAMAK de confinamiento del plasma empleado en el STARFIRE de Princeton.

mostración (DEMO) con valores de Q muy por encima de 1.

Los resultados logrados en los grandes Tokamaks facilitaron el acuerdo internacional en los siguientes puntos: a) la fusión por confinamiento magnético está preparada científica y tecnológicamente para emprender el proyecto de un "experimento controlado con un plasma encendido en condiciones de fusión" y con producción neta de energía de fusión; b) dicho experimento sólo puede ser llevado a cabo en la actualidad en un dispositivo de tipo Tokamak. Cualquier otro dispositivo alternativo con características prometedoras (constricción de campo invertido, espejos, esteleradores, etcétera) necesitaría al menos dos décadas para alcanzar el rendimiento de los Tokamaks; c) los estudios actuales de diseño de dicho experimento llevan a estimar (extrapolando resultados disponibles) la viabilidad científico-técnica de un reactor experimental de fusión tipo Tokamak con una producción de energía en el rango de 400-4000 millones de watts en plasmas encendidos durante 20-60 minutos. La construcción de dicho dispositivo podría comenzar en 1995 y funcionar a comienzos del siglo próximo. Ese proyecto recibe el nombre de ITER ("International Thermonuclear Experimental Reactor") y está previsto que participen en su financiación Estados Unidos, la URSS, Japón y la Comunidad Europea.

4. *Experimentos de fusión controlada con tritio.* Los resultados precedentes al 9 de noviembre se habían obtenido en plasmas de D-D; se temía que la utilización del T conllevara la activación de los materiales de la pared del JET y su inutilización consiguiente. Sin embargo, dentro del marco general de desarrollo de la experimentación con los Tokamaks JET y TFTR, se habían previsto para las últimas fases pruebas cercanas al valor de Q = 1, que exigían el empleo del combustible adecuado, es decir, deuterio y tritio. Sobre la base de los resultados obtenidos en el JET, se esperaba que el uso de una concentración mínima de T permitiría demostrar la producción de energía de fusión en el rango de 1 megawatt.

Se pretendía, con esos ensayos preliminares con tritio, adquirir experiencia en el uso del isótopo en los experimentos de fusión (mediante la producción de energía de fusión en el rango de 1 megawatt) y al mismo tiempo obtener información técnica con respecto a los siguientes puntos: 1) inyección, mezcla y extracción del T; 2) migración y retención del T en las paredes y componentes del dispositivo; 3) experiencia en el tratamiento de gases reactivos y sus problemas de seguridad; 4) fiabilidad y desarrollo de los diagnósticos del plasma compatibles con plasmas de D-T; 5) validación de los códigos de física de transporte del plasma a plasmas de D-T, y 6) estudio del transporte y calentamiento de un plasma por las partículas alfa (helio producido en la reacción de fusión).

Objetivos que se alcanzaron con total con éxito en el experimento mencionado, en el que se optimizaron las características de plasmas de D-D donde inyectar T. Después de varios plasmas previos (8 disparos) en los cuales se inyectó un 1% de T en un plasma de D, el sábado día 9 de noviembre se inyectó un 15% de T en plasmas de D calentados a la temperatura de 180 millones de grados. Durante dos segundos se obtuvo la producción de casi cien mil billones de neutrones por segundo con una energía equivalente a 1,8 millones de watts. Quedaba así demostrado que, aunque de forma transitoria (dos segundos), el hombre había sido capaz de reproducir el proceso básico de radiación de las estre-

llas. (José Antonio Tagle González, adscrito al Proyecto JET de la Comunidad Europea.)

¿Tablas?

Los maestros de ajedrez llevan siglos sosteniendo que en finales sin peones, como la posición que vemos en el recuadro izquierdo de la ilustración, la ventaja de la torre sobre el caballo no permite imponer la victoria. Jugando de manera óptima, entonaban unánimes, invariablemente se producen tablas. Un decepcionante resultado para el empecinado esfuerzo de la mente y ejercicio de amor propio que fue aplicado sobre el tablero.

Los maestros erraban. Un programa redactado por Lewis B. Stiller, posgraduado de la Universidad Johns Hopkins, tras funcionar durante más de cuatro horas en una computadora de procesamiento paralelo a gran escala, perteneciente a Thinking Machines Corporation, ha descubierto una forma de ganar. Al hacerlo, el programa produjo una línea de victoria de 223 jugadas, que es, con mucho, la más larga en los 1000 años de su historia.

Al igual que ciertas demostraciones matemáticas conseguidas mediante ordenador, el análisis es demasiado complicado para poder revisarlo... salvo mediante otro ordenador. "Rehicimos completamente las 173 primeras jugadas y efectuamos diversas otras verificaciones, así que es muy improbable que se haya deslizado algún error", afirma Stiller. "No obstante, estamos enfrentándonos a unos 32 billones de operaciones y es concebible que un neutrón errático pueda haber hecho impacto en alguno de los microcircuitos de la máquina."

Stiller proyectó su programa de forma que pudiera analizar todos los finales con dos reyes, cuatro piezas y ningún peón. La tarea, que supone la generación y clasificación de unos cien mil millones de posiciones, parte del final: el ordenador produce un puñado de posibles posiciones victoriosas y va retrogradando desde ellas, generando un árbol de análisis que se ramifica una y otra vez. Finalmente, la máquina determina si el equilibrio de fuerzas conduce a victoria en el caso general (es decir, en el caso de que el bando superior no se vea inmediatamente compelido a perder una pieza).

Durante las primeras doscientas jugadas, más o menos, las piezas trazan una danza caprichosa, sin obedecer a ninguna regla que un maestro humano pudiera reconocer y seguir. La situación sólo empieza a aclararse cercano ya el fin, cuando el rey negro se encuentra contra la pared y los caballos que lo asisten ya no pueden protegerse uno al otro. Al cabo de 222 jugadas el rey blanco está a punto de ocupar la casilla f5, forzando a las negras el sacrificio de un caballo. La subsiguiente batalla de rey, torre y alfil contra rey y caballo conduce rápida y sencillamente al jaque mate.

Kenneth L. Thompson, de los laboratorios Bell, fue el primero en aplicar al ajedrez el análisis retrógrado. Su programa demostró, por ejemplo, que rey y dama vencen contra rey y dos alfiles, un final que según los manuales de ajedrez tiene que acabar en tablas. El programa de Thompson agotó las posibilidades de los problemas con cinco piezas, hallando en uno de ellos una línea de victoria compuesta por 71 jugadas.

Tal hazaña sin precedentes obligó a la Federación Internacional de Ajedrez a enmendar la regla sobre la duración máxima de una partida antes de ser obligadamente declarada tablas. Anteriormente, se le exigía al jugador que forzase el jaque mate en un máximo de 50 jugadas tras la última captura de una pieza o movimiento de un peón, norma basada en la presunción humana —demasiado humana— de que ninguna línea conducente a la victoria podría en forma alguna ser mayor.

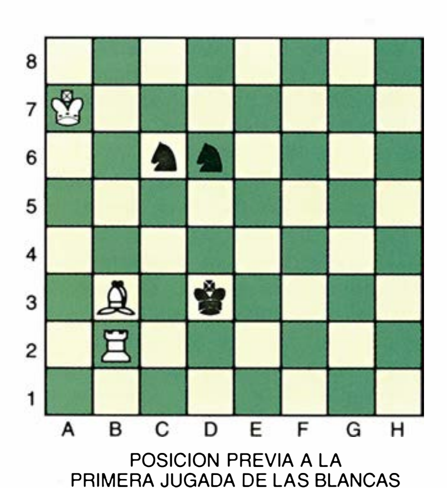
Stiller refinó el programa de Thompson con el fin de sacar partido de la Máquina de Conexión CM-2, que dispone de 65.536 procesadores y ocho mil millones de octetos de memoria. El algoritmo de Thompson, concebido para un solo procesador, tenía que introducir un paso extra para reducir el número de posiciones bajo examen, mientras que el algoritmo de Stiller es más sencillo. Examina más posiciones, aunque invierte menos tiempo en cada una.

No obstante, cuando han de jugar desde la posición inicial, los ordenadores todavía pierden frente a los más diestros jugadores humanos. Gary K. Kasparov, actual campeón mundial de ajedrez, ha jurado que jamás llegará a ser doblegado por una máquina. Pero aunque Kasparov ha vencido a Pensamiento Profundo, la máquina ajedrecística de IBM, los programadores de ésta esperan ofrecer en el plazo de un año otra inmensamente mejorada. Y pronostican que con ella concluirá para siempre el dominio de los humanos en el tablero.

Buckytubos

Con fullerenos podrían fabricarse las fibras más finas y resistentes. La familia de jaulas de carbono conocidas con el nombre de fullerenos ha demostrado ya que posee un haz de extraordinarias propiedades mecánicas, químicas, magnéticas y eléctricas, incluida la superconductividad a temperaturas elevadas. Puede haber todavía más. Poseen, eso parece, capacidad para formar tubos que sean, entre todas las fibras, los más finos, más perfectos en su estructura molecular, más resistentes al ataque químico y más tenaces.

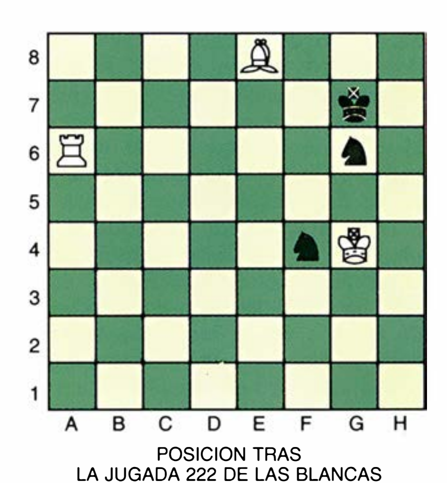
Sumio Iijima, investigador de la NEC Corporation, lo descubrió en mayo del año pasado mientras exami-



POSICION PREVIA A LA PRIMERA JUGADA DE LAS BLANCAS



POSICION CUANDO LAS BLANCAS VAN A EFECTUAR LA JUGADA 120



POSICION TRAS LA JUGADA 222 DE LAS BLANCAS

naba la costra de hollín formada sobre uno de los electrodos de un arco eléctrico que había estado utilizando para producir fullerenos. Vio allí fibras muy delgadas y tubulares, de un micrometro de longitud, teseladas de hexágonos que enlazaban apretadamente los átomos de carbono y rematadas en facetas cónicas.

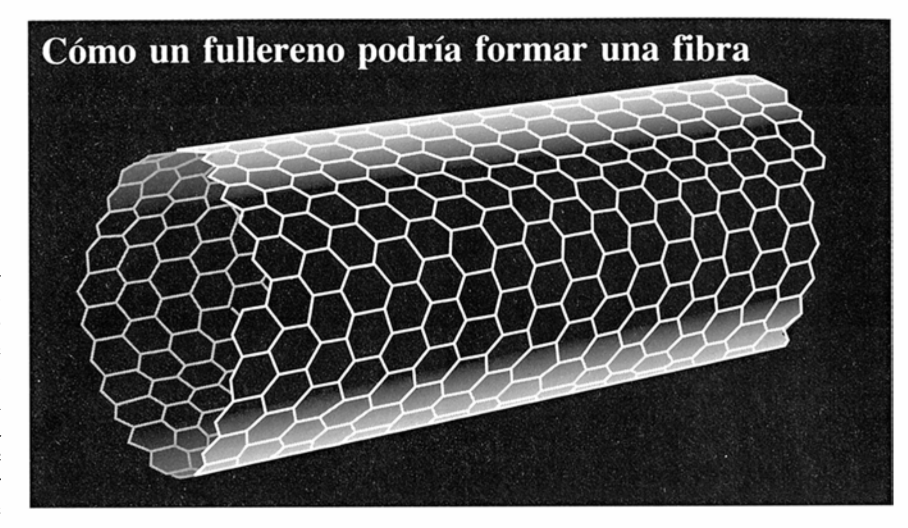
Por su pertenencia a la estructura básica constituida por 60 átomos de carbono, a los buckminsterfullerenos o "buckybolas", se dio el nombre de "buckytubos" a esas fibras. "Los buckytubos, confiesa IIjima, poseen una estructura muy interesante, para mí mucho más interesante que la de los buckybolas. Está en primer lugar su forma helicoidal, figura que no se había encontrado hasta ahora en los materiales inorgánicos; en segundo lugar, su conformación cilíndrica, algo insólito en una red cristalina." Más tarde, Iijima reconocería que ya Robert L. Whetten, de la Universidad de California en Los Angeles, había demostrado la forma helicoidal del fullereno C76. (Para Whetten, la mayoría, si no todos, los grandes fullerenos adquieren esa morfología en hélice.)

Iijima infirió la estructura tubular del estudio de las imágenes obtenidas con un microscopio electrónico de transmisión de alta resolución (capaz de hasta 500.000 aumentos) y del análisis de las figuras de difracción de electrones. Las imágenes ponían de manifiesto la existencia de secciones transversales de dos o más tubos coaxiales separados entre sí por un intervalo de 0,34 nanómetros, la distancia que viene a coincidir con la separación que media entre dos capas consecutivas de átomos de carbono en el grafito o también el radio de una buckybola.

En las figuras de difracción percibió una estructura cristalina constituida por anillos de carbono hexagonales, parecida a la que se observa en las láminas de grafito, aunque con una importante salvedad: los tubos constan de láminas de hexágonos cuyas filas, curvadas, se unen a la fila inmediata, desarrollándose así la espiral.

La extrema finura del canal tubular, con luz de dos nanómetros, explica el carácter insólito de ciertas propiedades físicas. "Estos tubos podrían comportarse como conducciones cuánticas", dice Iijima en referencia al túnel a través del cual los electrones podrían moverse sin esfuerzo. "¿Quién niega que la estructura no pueda ser superconductora?"

La resistencia mecánica de los buckytubos es una cualidad mucho más comprobable. "Pudiera tratarse de las fibras más resistentes que existen, quizás incluso las más resistentes que quepa imaginar", prosigue su descubridor. Deben esa resistencia a la naturaleza de los enlaces carbono-carbono, por una parte, y, por otra, a la estructura cuasi-perfecta que presentan los cristales tubulares. Por carecer de imperfecciones son, asimismo, mejores que el grafito.



Mildred S. Dresselhaus, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, predijo la existencia de estos tubos insólitos antes de que se descubrieran en un debate sobre moléculas hipotéticas mantenido con Richard E. Smalley, de la Universidad de Rice, y pionero del campo de los fullerenos. Smalley había defendido la teoría de que los buckytubos cicatrizarían espontáneamente sus extremos abiertos cuando se rompieran. Y se basa, para tal afirmación, en Leonhard Euler, matemático suizo del siglo XVIII que demostró que una lámina hexagonal de cualquier tamaño podría cerrarse para formar un poliedro sólo si añadía 12 pentágonos al conjunto. Smalley extrajo una conclusión fascinante: en el caso de que los buckytubos se cerraran, y crearan auténticos fullerenos, tenderían a "cicatrizarse" a sí mismos. Un buckytubo roto enlazaría los enlaces residuales sueltos formando nuevos pentágonos en el extremo abierto y produciendo su cierre.

Más interés que el cierre de las fibras posee el inicio de su crecimiento. "Es necesario que las fibras contengan un núcleo", dice Dresselhaus. "Su formación parte de agregados y, en vez de convertirse en esferas, se desarrolla en una estructura fibrilar". Si consiguieran dominar, armonizar, generalizar y producir a escala macroscópica ese crecimiento, los químicos podrían producir buckytubos con longitudes del orden de varios centímetros y dotados de cuantas capas se quisiera.

Los ingenieros sueñan con la posibilidad de fabricar fibras de carbono que sustituyan, con ventaja, al grafito como matriz de los compuestos carbono-carbono, base de los materiales sumamente resistentes y ligeros que se utilizan en aeronáutica. Las fibras de grafito son muy vulnerables a los más mínimos arañazos, abriendo así el camino a la oxidación. Un compuesto de buckytubos, capaz de autocicatrizarse, mantendría inalterada su resistencia.

Anti-nobel

Octubre de 1991. Hacia el Instituto de Tecnología de Massachusetts se encamina una auténtica muchedumbre para presenciar la primera ceremonia de entrega de los anti-nobel, o Nobel bufos. Han tomado asiento. Mirando con afectación exagerada por encima del hombro y ensartando infinitos disparates, un desternillante jurado delibera sobre los hitos ignominiosos de la ciencia.

Financian convocatoria y galardones el Museo del MIT y el *Journal of Irreproducible Results*, cuyo título evidencia paladinamente la naturaleza de su contenido. El director de la revista y maestro de ceremonias del acto, Marc Abrahams, aclara que los premios se conceden a aquellas personalidades sobresalientes cuyo trabajo no puede —ni debe— ser reproducido.

Presiden la augusta ceremonia cuatro Nobel de verdad: Sheldon L. Glashow, Dudley R. Herschbach, Eric S. Chivian y Henry W. Kendall. La rigurosa etiqueta de la indumentaria hace juego con la severidad de la ocasión. Y he aquí el veredicto: anti-nobel de química, a Jacques Benveniste, por su artículo de 1988 publicado en *Nature* sobre la memoria del agua respecto a los materiales disueltos en ella; anti-nobel de educación, creado *ad hoc*, al vicepresidente de los EE.UU. Dan



2. CEREMONIA de concesión de los premios anti-nobel. De izquierda a derecha y sentados: S.L. Glashow, E. S. Chivian, D.R. Herschbach y H. W. Kendall. Foto Stanley Rowin.

Quayle, por ser ejemplo acabado de "consumidor de tiempo y espacio" y dar pruebas más que suficientes de que necesita una buena educación científica; anti-nobel de física a Thomas Kyle, por su estudio sobre el administracio, el elemento más pesado de dentro y fuera de la tabla periódica, formado por un neutrón, ocho neutrones asistentes, 35 viceneutrones asesores y 256 asistentes parlamentarios de los viceneutrones. Kyle no aceptó el galardón ya que, según explicó, siguiendo con la más pura tradición científica, su única contribución había consistido en la firma del artículo sin haber colaborado en la investigación de ninguna otra forma; anti-nobel de la paz, a Edward Teller, por haber retorcido el sentido de esa hermosa palabra y haberse convertido en padre de todas las bombas nucleares y general estratega de la guerra de las galaxias (vulgo, Iniciativa para la Defensa Estratégica); anti-nobel de biología, a Robert Klark Graham, símbolo del espíritu conservacionista a través de la creación de bancos de esperma de premios Nobel y deportistas (sin SIDA). La noche se hizo muy larga, pues eran muchos los candidatos y numerosas las disciplinas, como la del financiero encarcelado que se llevó el anti-nobel de economía, o el de historia, concedido a un julio verne de secano sobre la invasión extraterrestre de nuestro planeta antes del advenimiento del hombre. Como nunca llueve a gusto de todos, se han recibido infinitas cartas quejándose del injusto olvido de B. Stanley Pons y Martin Fleishman, descubridores de la fusión fría. La fortuna habrá de sonreírles, sin duda, el próximo año.

Ráfagas de estrellas

Una vez cada varios siglos brilla en el cielo con luz sin par una supernova. Pero si nos atenemos a la banda de los rayos gamma, el universo resulta muchísimo más dinámico: no pasa un día sin que aparezcan ráfagas brillantes de radiación gamma energética, que duran de una milésima de segundo a cien segundos.

A lo largo de las dos últimas décadas, los astrofísicos han elaborado teorías refinadas para explicar las ráfagas. Explicaciones que no parecen encajar con el comportamiento detectado por el Observatorio Compton (sucesor del Observatorio de Rayos Gamma): las ráfagas y otros fenómenos de rayos gamma se conducen de forma injustificable.

La mayoría de los modelos atribuyen la emisión de radiación a la caída de materia hacia una estrella de neutrones (un estado ultradenso terminal de la evolución estelar) o a la inestabilidad transitoria de una estrella de neutrones. Dada la distribución de estrellas de neutrones en toda la galaxia, cabría esperar que las ráfagas —en particular las más débiles y alejadas— se acumularan a lo largo del plano de la galaxia; así lo hacen las estrellas débiles responsables de la banda luminosa de la Vía Láctea.

Hasta el último recuento hecho público, septiembre del año pasado, uno de los detectores más sensibles del Observatorio Compton, el BATSE ("Burst and Transient Source Experiment"), había anotado 117 ráfagas. Mas, para sorpresa de todos, las ráfagas ofrecen una distribución casi uniforme por todo el firmamento, prueba de que no proceden de nuestra galaxia, lo que obliga a revisar, sino abandonar, las teorías en boga.

Descubre también el detector BATSE la existencia de una cota en el brillo de las ráfagas. La ausencia de señales de poca intensidad denuncia la existencia de un límite allende el cual no se observan ráfagas; límite que parece forzoso ponerlo en la frontera de la Vía Láctea. Ahora bien, si no hay tal distribución uniforme de ráfagas por la galaxia, habrá que aceptar que o bien se trata de fenómenos locales (en cuyo caso la existencia de una frontera resulta desconcertante) o bien corresponden a eventos extraordinariamente luminosos en galaxias distantes (en cuyo caso el límite podría asimilarse al extremo visible del universo).

Muchos astrofísicos se resisten a abandonar la hipótesis de la estrella de neutrones. Marvin Leventhal, de los laboratorios Bell AT&T, juega con la idea de estrellas de neutrones que residen mucho más allá del plano de la galaxia; esas estrellas originarían las ráfagas al cruzarse con materia oscura del halo galáctico. Otros expertos dan una explicación más simple de los datos del Compton: el BATSE detecta dos tipos de ráfagas de rayos gamma, una población débil e isotrópica y una segunda población de objetos menos comunes, más brillantes y mucho más distantes. Ambos fenómenos encajan, afirman, en el marco argumentativo de la hipótesis de la estrella de neutrones.

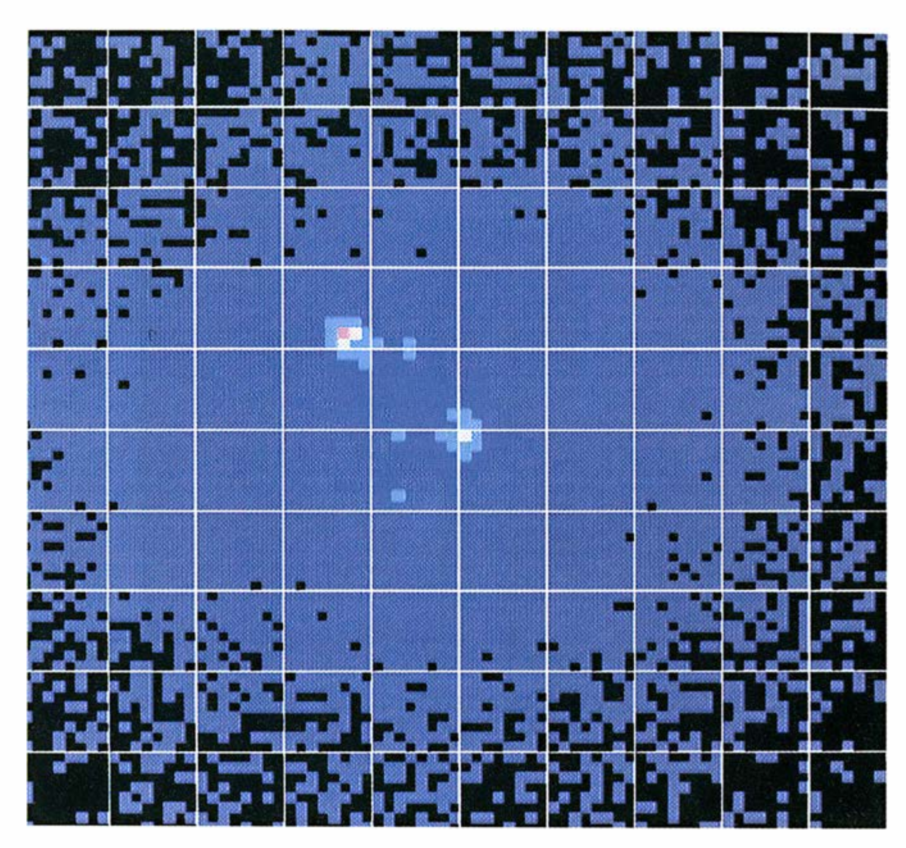
Bohdan Paczynski, de Princeton, no aceptó nunca ese modelo teórico. Para él, las ráfagas se producen muy lejos de nuestra galaxia. El encuentro, poco frecuente pero extremadamente energético, entre estrellas de neutrones y agujeros negros podría crear ráfagas de radiación gamma que se verían incluso en galaxias remotas.

Dentro de uno o dos años, dispondremos de un mapa más preciso del fenómeno, y con él, un criterio mejor fundado para apreciar su distribución real. Si esos pulsos de rayos gamma se originan en galaxias distantes, el BATSE terminaría por detectar imágenes desdobladas por la influencia de la gravedad de las galaxias interpuestas. Estas ráfagas desdobladas serían idénticas, aunque separadas por el intervalo de unas semanas.

El COMPTEL ("Compton Imaging Telescope"), instalado también en el

Observatorio Compton habrá de contribuir a develar el misterio. Este instrumento ha captado las primeras imágenes de una ráfaga de rayos gamma en el acto. Las imágenes que se tomen facilitarán la orientación de los telescopios hacia el punto exacto de donde procede la ráfaga para averiguar si se distingue algún objeto más en otras longitudes de onda. Hay a bordo del Compton varios instrumentos más, que registran la distribución de energía y el comportamiento a muy corto plazo de las ráfagas, datos importantes para sopesar la coherencia de los modelos propuestos.

No acaban ahí los rompecabezas planteados por el trabajo del satélite. Así, el penetrante resplandor de radiación gamma procedente del corazón de la Vía Láctea, atribuido hasta hace poco a la radiación combinada de una multitud de restos de supernova, aparece inexplicablemente concentrado en el centro de la galaxia. También, Geminga, un objeto enigmático, se nos ofrece en la banda de los rayos gamma de mayor energía, en tanto que resulta invisible en todas las energías inferiores.



3. IMAGEN DE RAYOS GAMMA registrada por el Observatorio Compton: muestra la Nebulosa del Cangrejo (derecha) y la enigmática fuente conocida como Geminga (izquierda). Foto: NASA

Peroxidasas vegetales

Las peroxidasas constituyen un grupo de enzimas, ampliamente distribuido en la naturaleza, cuya función consiste en oxidar sustratos a expensas de peróxido de hidrógeno. La actividad peroxidasa fue, conjuntamente con la actividad amilasa, una de las primeras actividades enzimáticas conocidas.

Las peroxidasas son holoenzimas. Constan de una glicoproteína, de suyo inactiva, y un grupo prostético de naturaleza ferriporfirínica (protohematina IX); el grupo prostético está constituido por Fe (III) y protoporfirina IX. En cuanto hemoproteínas, las peroxidasas guardan relación estructural con otros grupos de hemoproteínas: con los citocromos (integrantes de las cadenas de transporte electrónico mitocondrial y cloroplástica) y con las proteínas que ligan oxígeno molecular (mioglobina del músculo y hemoglobina sanguínea.)

De acuerdo con su parcial similitud estructural, las peroxidasas poseen las propiedades de estos dos grupos de proteínas. Lo mismo que los citocromos, las peroxidasas sufren procesos de oxidorreducción entre las formas férricas y ferrosas de la enzima. A imagen de la mioglobina y la hemoglobina, en su forma reducida de ferroenzima unen oxígeno molecular. Se distingue, empero, de uno y otro grupo. Los citocromos existen con dos grados de oxidación, pero no fijan oxígeno; aunque las globinas unen oxígeno, su hierro hemínico siempre se encuentra como ion ferroso.

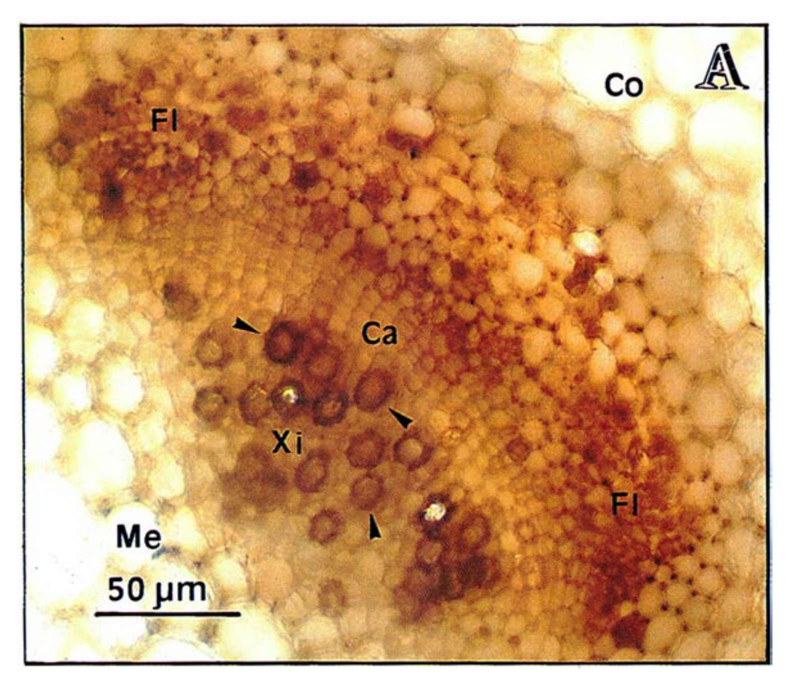
El mecanismo de acción de las peroxidasas se entiende fácilmente a través de esas dos propiedades. Así, la forma férrica de la enzima [PoFe (III) OH2] puede ser reducida a su forma ferrosa [PoFe (II)] por varias substancias; por ejemplo, el ácido indol-3-acético. La forma ferrosa (Fe2+), al unirse al oxígeno, genera oxiferroperoxidasa [PoFe (II) O2] o compuesto III (C III) de la enzima. El compuesto III posee una reactividad especial: su molécula de oxígeno es capaz de aceptar dos electrones, uno del propio ion ferroso hemínico y otro de un sustrato fenólico, para regenerar la forma férrica de la enzima y producir peróxido de hidrógeno. Estas tres reacciones definen uno de los ciclos catalíticos de la enzima: el ciclo de oxidasa.

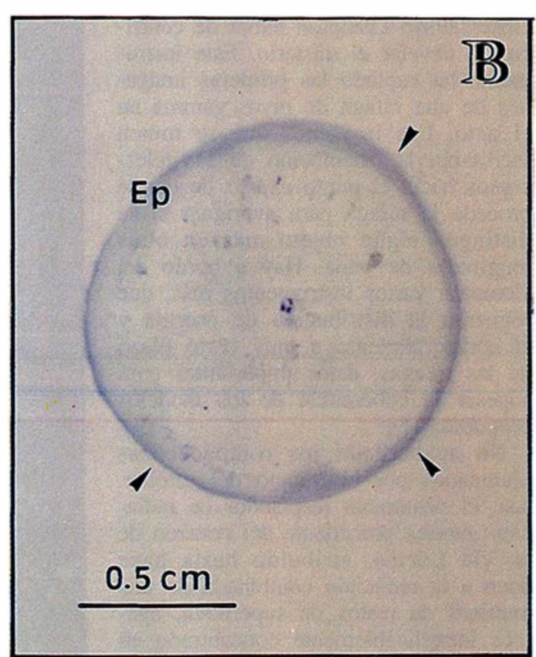
La peroxidasa también trabaja de acuerdo con un segundo ciclo catalítico. En éste, el peróxido de hidrógeno oxida a la forma férrica de la enzima (Fe^{3+}) y produce el compuesto I (C I) [$Po^{+}Fe(IV)\ O^{-2}$], intermedio que se reduce en dos etapas monoelectrónicas generando consecutivamente compuesto II (C II) [PoFe(IV) OH-] y, posteriormente, la ferrienzima [PoFe(III) OH_2]. Este ciclo de actuación constituye lo que se conoce como ciclo peroxidasa.

El mecanismo de acción de las peroxidasas es bastante complejo, pero es su complejidad la que les confiere sus especiales propiedades catalíticas y su gran versatilidad bioquímica. Así, a través de ciclos alternativos oxidasa/peroxidasa se fabrica peróxido de hidrógeno y se aprovecha en procesos peroxidativos. Debido a que sus transiciones redox son monoelectrónicas, sus sustratos (fundamentalmente de naturaleza fenólica) se oxidan a radicales libres, altamente reactivos. Los radicales libres fenoxilo se acoplan entre sí para dar lugar a estructuras difenilo. Esta reacción es la etapa inicial en el proceso de formación de ligninas que se desarrolla en los tejidos vasculares del xilema.

Si las peroxidasas vegetales careciearan del ciclo oxidasa (a través del cual se genera el peróxido de hidrógeno), su localización y, de paso, su funcionalidad en la célula vegetal se restringirían a los orgánulos donde se produce de forma incesante peróxido de hidrógeno (cloroplastos, mitocondrias, peroxisomas o glioxisomas).

Ahora bien, cloroplastos y mitocon-





4. LOCALIZACION DE LA PEROXIDASA en los tejidos vasculares de hipocótilos de altramuz (A) y en la epidermis de la uva "Thompson-seedless" (B). Co = córtex, Ca = cambium vascular, Ep = epidermis, Fl = floema, Me = médula, Xi = xilema.

drias poseen niveles bajísimos de peroxidasas; peroxisomas y glioxisomas carecen de ellos. En los dos primeros orgánulos, la función de la peroxidasa parece estar más relacionada con la reducción del peróxido de hidrógeno a agua, en una reacción típica de detoxificación.

La peroxidasa se encuentra principalmente en la pared celular y las vacuolas de células vegetales, aunque aparece también en el citosol de ciertos tipos especializados de células. De todo ello se infiere la verosimilitud de que sea la propia peroxidasa la que, como oxidasa, genere el peróxido de hidrógeno que luego consume a través del ciclo peroxidasa en la oxidación de compuestos fenólicos. Esta singularidad de la enzima podría explicar la funcionalidad de un sistema catalítico que necesita peróxido de hidrógeno para su actuación y se aloja, sin embargo, en compartimentos subcelulares donde los niveles de aquél son sumamente bajos o quizás, incluso, nulos.

Recientemente, se ha propuesto la existencia de sistemas alternativos generadores de peróxido en la pared celular de células vegetales, basados en la oxidación de diaminas y poliaminas por el sistema enzimático de la diamina/poliamina oxidasa.

Adelantemos, sin embargo, que su funcionalidad en el xilema no está clara, por la razón principal de que las poliaminas, sustancias reguladoras del desarrollo vegetal, se hallan estrechamente asociadas a tejidos con actividad mitótica casi permanente. Recuérdese además, que las poliaminas inhiben la xilogénesis y se oponen a la secreción de peroxidasas en la pared celular, fenómenos ambos antagónicos con cualquier papel de éstas en la generación del peróxido de hidrógeno necesario para la lignificación del xilema.

De forma contraria a las poliaminas actúa, en ciertos casos, otro regulador del desarrollo: el ácido indol-3-acético, promotor de la xilogénesis y de la diferenciación vascular de los tejidos. Se observa, además, que los tejidos lignificantes del xilema oxidan también en buena parte el ácido indol-3-acético. Datos que sugieren que es el propio ácido indol-3-acético el reductor que interviene en la reducción de ferri a ferroperoxidasa, iniciando así el ciclo catalítico y que, en presencia de alcoholes cinamílicos (que constituyen los fenoles precursores), esta reacción desencadena el proceso de oxidación de fenoles con la consiguiente formación de ligninas.

En el marco de esta hipótesis, interesa destacar que cierto tipo de isoenzimas de la peroxidasa (las de punto isoeléctrico ácido) resulta ser el más eficaz, lo mismo en la oxidación del ácido indol-3-acético que en la del alcohol coniferílico a ligninas. Esas isoenzimas suelen localizarse en las paredes celulares de los tejidos vasculares y, especialmente, en el xilema, donde se mueven con libertad; aparecen también en la savia con una probable función de atorar (mediante la deposición de polímeros fenólicos) los tejidos vasculares dañados.

Pero no hemos de limitar la función que la peroxidasa desempeña en la planta a un papel puramente catalítico en el proceso de lignificación del xilema; la enzima se expresa también en la epidermis de los órganos aéreos. A ello cabría añadir un hallazgo reciente: la sobreexpresión de un gen de la peroxidasa en plantas transgénicas de tabaco es un proceso que está acompañado de cambios fenotípicos que se manifiestan en la pérdida de turgor de la planta durante el período de la floración. Estas observaciones nos hacen comprender que aún estamos lejos de conocer en toda su extensión el papel que las peroxidasas desempeñan en el metabolismo vegetal y, por ende, su significado en la fisiología de las plantas vasculares. (R. Muñoz y A. Ros Barceló, de la Universidad de Murcia.)

Mamíferos del Jurásico

¿Descendieron de los árboles mamíferos marsupiales y placentarios antes de que los monos treparan a ellos? Se ha dicho a veces que el progreso científico avanza a saltos; ello es especialmente cierto en paleontología, donde basta un nuevo fósil para arruinar una filiación o para consolidarla. Abundando en ello, los restos de un mamífero de hace 140 millones de años demuestran que nuestros re-

motos antepasados vivían en los árboles. Seamos o no primos de los monos, descendemos del árbol.

Los mamíferos que pueblan la Tierra pertenecen a tres grupos, que se distinguen por su modo de reproducción: Monotremas, Marsupiales y Placentarios. Los Monotremas (los más primitivos) ponen huevos como las aves y, sobre todo, como los reptiles, de los que descienden los mamíferos. Sus únicos supervivientes actuales son el ornitorrinco de Australia y los equidnas de Australia y de Nueva Guinea. En los Marsupiales (como los canguros), el embrión permanece poco tiempo en el útero de la madre y prosigue su desarrollo, después de un nacimiento prematuro, en una bolsa ventral externa. Hay Marsupiales en Australia y las dos Américas. Finalmente, los Placentarios, como el hombre, se caracterizan por un modo de reproducción en el que la cría nace completamente desarrollada y viable; son los mamíferos actuales más prósperos, presentes en todos los continentes.

Mientras que el origen de los Monotremas sigue siendo oscuro, el de los Marsupiales y los Placentarios era conocido gracias a una abundante documentación paleontológica, que recapitula su historia a lo largo de más de un centenar de millones de años. Dicha documentación muestra, en particular, que Marsupiales y Placentarios descienden de un mismo antepasado, al que se le supuso un modo de vida arborícola.

Esta hipótesis fue formulada por Huxley en 1880 con relación a los Marsupiales: su pie generalmente prénsil, con el pulgar oponible a los demás dedos, sugería una adaptación a una vida que transcurría esencialmente en los árboles. La idea de un antepasado común a Marsupiales y Placentarios, de modo de vida arborícola, permaneció durante mucho tiempo en el terreno teórico a falta de fósiles suficientes. Ni siquiera el reciente descubrimiento, en Asia, de restos bastante completos de placentarios arcaicos del Cretácico superior (de hace unos 75 millones de años), como los de *Asioryctes*, nos permitía determinar si el modo de locomoción era primitivamente terrestre o arborícola.

Situación que puede cambiar gracias al hallazgo de Bernard Krebs y su grupo, de la Universidad Libre de Berlín, en una mina de lignito del Jurásico superior, en Guimarota (Portugal). El fósil recuperado aporta valiosa información: es el primer esqueleto articulado, casi completo, de un mamífero jurásico. El yacimiento fosilífero se conocía desde 1959; W. Kühne había descubierto allí muchos vertebrados, mientras la mina estaba abierta. El grupo de B. Krebs volvió a partir de 1972, después de la quiebra de la mina, porque es sabido que los lignitos constituyen una facies sedimentaria favorable al descubrimiento de restos esqueléticos articulados de vertebrados terrestres.

Antes de excavar hubo que bombear las galerías inundadas (algunas de ellas también derrumbadas), consolidarlas, disponer su ventilación e instalar el tendido eléctrico. El esfuerzo merecía la pena: a 80 metros de profundidad, los paleontólogos sacaron a la luz (si es que así puede decirse) una riquísima fauna de vertebrados que habían vivido hace unos 140 millones de años: peces, anfibios —urodelos ("salamandras") y anuros ("ranas")—, tortugas, lagartos, cocodrilos, dinosaurios y, quizá también, pterosaurios.

Se salvaron, no obstante, pocos cráneos y esqueletos completos, porque era difícil descubrirlos antes del lavado y tamizado de los sedimentos. Se recuperó un millar de fragmentos de mandíbulas de mamíferos pertenecientes a unas 15 especies, y algunas piezas espectaculares, entre las cuales el esqueleto de un antepasado cercano de Marsupiales y Placentarios.

Este esqueleto es el de un mamífero que tenía la talla de un ratón y un esqueleto óseo más evolucionado que la dentadura. B. Krebs ha hecho de él una nueva especie de un nuevo género, *Henkelotherium guimarotae*, única representante de la nueva familia Henkelotéridos, de este grupo de los eupantoterios cercano (según los dientes) al origen de los Marsupiales y de los Placentarios.

Aunque posee ciertos rasgos arcaicos, el esqueleto de este mamífero se parece de forma sorprendente al de las pequeñas especies primitivas actuales de marsupiales (Didélfidos) y placentarios (Insectívoros). Por otra parte, la anatomía de la gran cola de *Henkelotherium*, provista de vértebras alargadas, así como la del pie y de la mano, singularizados por unas penúltimas falanges muy largas y por la presencia de garras en guisa de últimas falanges, han llevado a B. Krebs y a sus colegas a concluir que el animal era arborícola. No se trata, sin embargo, de un animal de pies (ni manos, ni cola) prénsiles, como pensaban los antiguos naturalistas: la anatomía de *Henkelotherium* es más bien la de un "trepador con garras", que se desplaza en los árboles como lo hace una ardilla común, trepando con ayuda de sus garras y saltando de rama en rama mientras se equilibra con ayuda de la cola.

El parecido del esqueleto de *Henkelotherium* al de Marsupiales y Placentarios, más aún que las semejanzas de los dientes, confirma que estos dos grupos de mamíferos descienden de un antepasado muy próximo a él y que tenía el mismo estadio de organización y de adaptación general (en particular el modo de locomoción). *Henkelothe-*



5. HENKELOTHERIUM GUIMAROTAE, antepasado de los mamíferos placentarios y marsupiales, era seguramente arborícola. Aquí aparece representada sobre un ginkgo. Los restos se han encontrado en una mina de Portugal.

rium constituye, pues, la prueba paleontológica de que los Marsupiales y los Placentarios modernos descienden de formas arborícolas. Todos los modos de locomoción de Placentarios y Marsupiales distintos de este tipo primario, en particular la locomoción terrestre o incluso arborícola con pie prénsil, como la de los Primates, parecen haberse desarrollado secundariamente. (Emmanuel Gheerbrant, adscrito al CNRS y profesor de la Universidad de París VI.)

Reacción cruzada

La imagen típica que se tiene de la infección de SIDA es que el virus se limita a atacar y destruir las células T4, componente crucial del sistema inmune. Pero no ha pasado inadvertida, para algunos por lo menos, la convergencia de rasgos clínicos del síndrome de inmunodeficiencia adquirida con los manifestados en el rechazo del trasplante. Este estado morboso, que con frecuencia es fatal, aparece cuando las células inmunitarias trasplantadas, pensemos en las de la médula ósea, atacan a su nuevo patrón; en el blanco de esa agresión van incluidas las células supresoras T que regulan el sistema inmune.

Dos estudios recientes con animales de laboratorio han aportado datos sorprendentes que añaden credibilidad a las teorías según las cuales el SIDA tendría bastante en común con el rechazo de trasplantes. Estos hallazgos, si se confirman, podrían encauzar las investigaciones empeñadas en crear la vacuna que proteja de la infección o ataje el deterioro del sistema inmune en las personas ya infectadas. Aunque ninguno de tales hallazgos pone en duda el papel básico de la infección del HIV en el SIDA, ambos llaman la atención sobre el mecanismo de la respuesta inmune contra la presencia de células extrañas.

Angus G. Dalgleish, del Hospital de San Jorge en Londres, y John A. Habeshaw, del Hospital Real de Londres, vienen afirmando desde hace algunos años que la infección del HIV desencadena el ataque del sistema inmune contra su propio cuerpo. Dalgleish y Habeshaw creen que GP120, proteína de la cápside del HIV, bloquea el sistema inmune. La estructura química de GP120 recuerda, asimismo, la de ciertas partes del complejo principal de histocompatibilidad (MHC) de la clase II, moléculas que identifican las células inmunitarias como células del propio cuerpo. Esa similaridad, opina Dalgleish, permite una reacción cruzada en la que el sistema inmune ataca las células del propio cuerpo como si se tratara de células extrañas. El síndrome resultante se parece a la enfermedad del rechazo.

Tracy A. Kion y Geoffrey W. Hoffmann, de la Universidad de la Columbia Británica, abundan en esa dirección. Muchas personas infectadas con el HIV podrían haber estado expuestas a células inmunitarias "extrañas" (células del sistema inmune de otra persona) y pasar éstas a los fluidos corporales. Prosiguen: las personas que han estado expuestas a células extrañas y al HIV, a la vez, desencadenan dos tipos distintos de respuesta inmune, una contra las células y otra contra el virus. Cada respuesta ataca a un subgrupo de células T, células coadyuvantes y supresoras, que desestabilizan sin remisión uno de los mecanismos autorreguladores del sistema inmune, lo que provoca que éste se destruya a sí mismo.

Kion y Hoffmann respaldan su argumentación con la observación experimental. En sus ensayos, los ratones expuestos a células de una cepa de ratones distinta liberaban, de forma espontánea, anticuerpos contra la proteína GP120, así como contra una proteína del núcleo del HIV, por más que los animales no entraran nunca en contacto con el virus de la inmunodeficiencia adquirida. Los ratones fabricaron, además, anticuerpos que se parecían a las moléculas del complejo mayor de histocompatibilidad, en perfecta coherencia con la predicción teórica.

Los ratones criados especialmente para que desarrollaran una enfermedad autoinmune similar al lupus erythematosus generaban también, de manera espontánea, anticuerpos contra GP120 y anticuerpos similares al MHC. El hecho de que los ratones puedan producir anticuerpos contra la GP120 sin haber estado nunca expuestos al HIV mueve a aceptar que existe realmente una semejanza significativa entre la GP120 y las moléculas que operan en la respuesta inmune.

El segundo estudio lo encabezó E. James Stott, del Instituto Nacional británico para las Normas y el Control Biológicos. Demostró que puede protegerse a macacos frente a la infección por el virus de la inmunodeficiencia simiana (SIV) con la simple inmunización mediante células T humanas; de acuerdo con lo esperado, sin embargo, la respuesta protectora de anticuerpo ocurriría sólo cuando se les inmunizara con células T previamente infectadas con SIV.

Sucedió, por contra, que los simios que produjeron elevados niveles de anticuerpos, tras su inmunización con células T humanas, quedaron defendidos

frente a la infección ulterior con SIV, estuvieran o no las células T infectadas con el virus de la inmunodeficiencia simiana.

Implantes para corregir la miopía

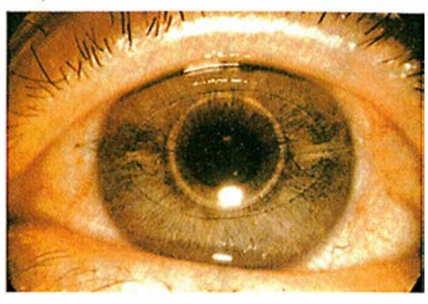
Las miopías agudas pueden ya corregirse con lentes cóncavas, de vidrio acrílico o silicona, que se implantan en el interior del ojo. La miopía es un defecto de la vista que está muy extendido. Puede alcanzar tal gravedad (hasta más de 30 dioptrías), que limite la capacidad de desenvolvimiento del individuo.

La corrección de miopías agudas con gafas comporta inconvenientes serios. El miope sólo ve con nitidez a través del centro de las gafas. Su campo visual queda así circunscrito concéntricamente. Además, la imagen del objeto en la retina es menor que la observada en un ojo sano, lo que reduce la capacidad de visión. Sin olvidar su importancia en la presencia estética del individuo, mermada por los gruesos cristales de las gafas.

Con las lentes de contacto se pueden remediar todos esos problemas. Es una lástima que las rechacen los ojos de muchos miopes. Para ahorrarles las antiparras a estos pacientes, Jan G. F. Worst, médico del Hospital Rafaja en Groeningen, el autor de esta nota y Gerrit L. van Hejde, del Departamento de Física Médica de la Universidad Libre de Amsterdam, han desarrollado una lente de vidrio acrílico que se implanta en el ojo. Nuestra lente artificial, oval, posee un espesor máximo de 1,3 mm; se fija al iris con ayuda de micrograpas y se deja flotando en el fluido ocular, delante de la pupila. Su peso en ese humor es de unos pocos miligramos.

En 1986 realicé el primer implante de una lente de estas características. De entonces acá se han llevado a cabo unas 200 intervenciones; de ellas, 129 por mí mismo. Podemos, por tanto, hacer un primer balance y, basándonos en nuestra propia experiencia, sopesar los beneficios y riesgos que la operación entraña.





6. La lente bicóncava Worst-Fechner antes (izquierda) y tras el implante (derecha)

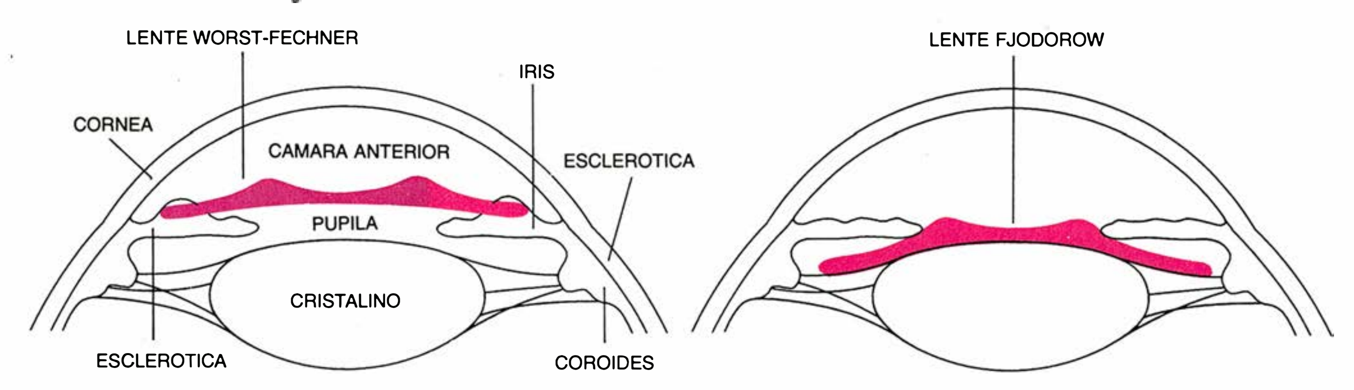
El beneficio, sobre todo psicológico, para el paciente es enorme. Pero no deben menospreciarse los peligros. Se trata de una operación muy difícil, que precisa de microscopio, y sería una tragedia que en una intervención beneficiosa para el paciente, aunque no imprescindible, se llegara a la pérdida del ojo. Los oftalmólogos temían en un comienzo la lesión ocular o la infección del órgano, por la anestesia local requerida en la operación. Complicaciones plausibles serían el daño del cristalino o el aumento desmedido y persistente de la presión interna del ojo. Por fortuna, ninguno de esos peligros se ha materializado hasta este momento.

Lo que no se ha podido evitar es la agresión a la superficie interna de la córnea (endotelio posterior), de extrema sensibilidad. Si el daño es de consideración, entra humor acuoso en la córnea y ésta se enturbia. En tres casos se observó un obscurecimiento de este tipo, que obligó a un transplante de córnea adicional. Mi colega Worst y yo confiamos, sin embargo, en evitar tales complicaciones en el futuro, limitando el implante a los miopes en los que la distancia mínima entre iris y córnea sea de 3,7 milímetros.

Para recopilar datos sobre la tolerancia a largo plazo de la lente Worst-Fechner, Jürgen Strobel investigó, en la Clínica Oftalmológica de la Universidad de Giessen, el comportamiento de 68 pacientes a los que se les había implantado. Se sirvió de un aparato lasérico que reconoce muestras ínfimas de proteínas y células del interior del ojo y las registra. Los resultados demostraron que no había se había experimentado el aumento de ninguna concentración, normal, lo que respalda la idea de que la lente no provoca ninguna reacción de rechazo o cicatrización.

Pero debemos insistir en que la córnea puede verse afectada, lo que hace necesarios periódicos controles.

En esta situación, reviste particular interés otro modelo de lente que acaba de aparecer en Occidente. En Rusia viene aplicándose desde 1986 y se ha implantado en más de 700 ocasiones. La lente, de silicona, ha sido desarrollada por S. N. Fjodorow y W. K. Sujew en el Instituto de Microcirugía Ocular de Moscú. Se introduce entre el iris y el cristalino. No puede, pues, dañar la córnea. Pero convendría saber si impide el adecuado intercambio de materia del cristalino, lo que repercutiría en el enturbiamiento del propio cristalino. Los médicos rusos aseguran que ese riesgo no se ha producido. (Paul U. Fechner, del Hospital Robert-Koch de Gehrden en Hannover.)



7. La lente Worst-Fechner se implanta delante del iris (izquierda), la lente Fjodorow detrás (derecha).

De cerca

Fotos y texto: Satoshi Kuribayashi

Vuelo de la chinche de campo

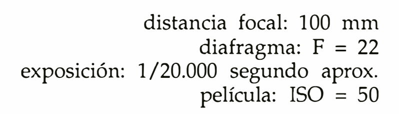
De niño solía divertirme cazando cigarras. Me gustaba oírlas cantar y ver cómo batían las alas. Y así me familiaricé muy pronto con su estructura alar. Cuando abren las alas anteriores, su margen distal se acopla con el borde frontal de las alas posteriores. Se alzan, pues, al unísono. Ocurre eso también con otros insectos. Por ejemplo, con la familia de los pentatómidos, a la que pertenecen las chinches de campo, con sus tarsos de tres artejos y escutelo de cinco artejos que cubre buena parte del abdomen. Las chinches, que se visten de muchos colores, son cosmopolitas (abundan en los trópicos y en zonas frías) y, por lo común, se alimentan de distintas especies vegetales, aunque las hay también fieles a un mismo grupo.

A la geometría de sus formas y a su coloración remiten la mayoría de los epítetos de especie con que se las designa: *viridula, pruinosa, coerulea, lineatum, flavescens.* Como si se quisiera así enmascarar el intenso olor desagradable que despiden. Nunca se me ocurriría a mí cazar una con las manos. Aunque pasen ante mí en bandada.

Pero miremos de cerca el vuelo de ese pentatómido. Advertiremos el estrecho parecido de la disposición de sus alas con las de la cigarra. Para realizar la fotografía en el estudio, coloqué un tubo encima de la chinche, esperando que ascendiera por el mismo. Acerqué el tubo ante la cámara. El insecto inició su vuelo al llegar a la parte superior del tubo, instante que descubrió el detector de infrarrojos. A ese preciso momento responde la fotografía de la derecha.






distancia focal: 100 mm
diafragma: F = 22
exposición: 1/20.000 segundo aprox.
película: ISO = 50



Anticaos y adaptación

Quizás en la evolución biológica intervino algo más que la selección natural. Los modelos de ordenador sugieren que los sistemas complejos tienden hacia la autoorganización

Stuart A. Kauffman

Los descubrimientos matemáticos traen, para los biólogos, una invitación sugestiva: interpretar de forma distinta la aparición del orden en la evolución. Los seres vivos constituyen sistemas ordenados en grado sumo; poseen intrincadas estructuras que se mantienen y duplican a través de un ballet puntillista de actividades químicas y conductuales. Los biólogos, desde Darwin, han venido considerando que la única fuente y causa de tal orden era la selección natural.

Pero Darwin no podía sospechar la existencia de autoorganización, una propiedad innata de ciertos sistemas complejos, hace poco descubierta. Es posible que el orden biológico sea, en parte, reflejo de un orden espontáneo, sobre el que ha operado la selección natural, selección que se habría encargado de moldear la coherencia que forma parte intrínseca de la ontogenia, del desarrollo biológico, aunque no tuvo la obligación de inventarla. Pudiera ocurrir, incluso, que la capacidad de evolucionar y adaptarse constituyera en sí misma un logro de la evolución.

Los estudios que apoyan conclusión tan rotunda se mueven todavía en el terreno de la provisionalidad. Mas, a pesar de su carácter incompleto, los constructos matemáticos que remedan sistemas biológicos capaces de autoorganizarse nos facultan para avanzar hipótesis coherentes con las propiedades observadas en los organismos. Podríamos empezar a entender el proceso evolutivo como un compromiso transaccional entre la selección y la autoorganización.

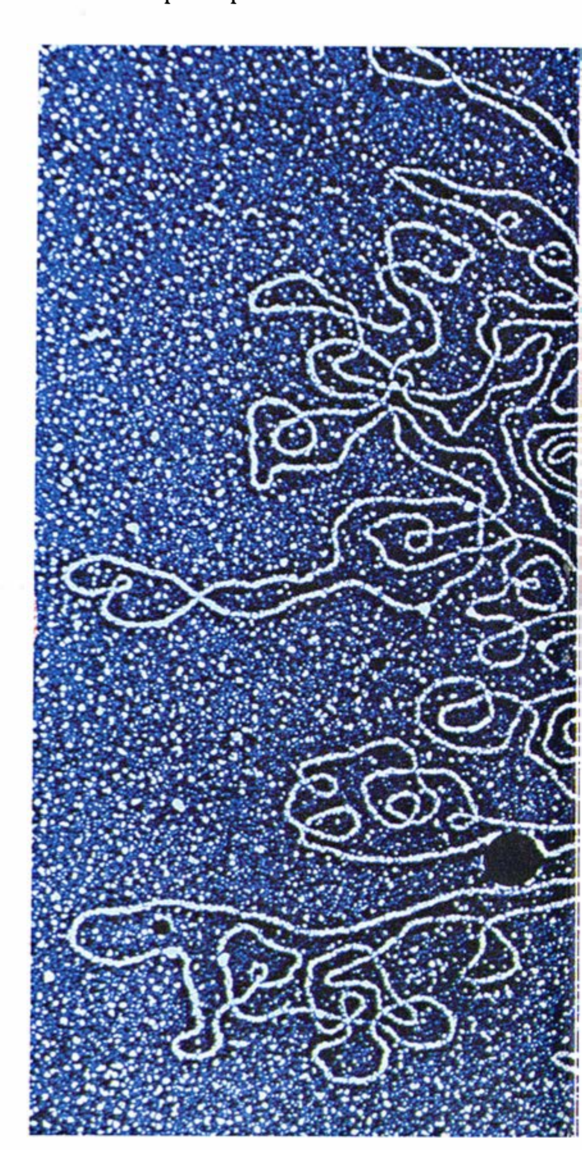
STUART A. KAUFFMAN ha venido reflexionando sobre autoorganización en los seres vivos desde 1965. Inició su formación en Darmouth, la continuó en la Universidad de Oxford y se licenció en medicina por la de California en San Francisco, en 1968. Desde entonces ha ocupado diversos puestos en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, la Universidad de Chicago y el Instituto Nacional del Cáncer. En la actualidad, Kauffman es catedrático de bioquímica y biofísica en la facultad de medicina de la Universidad de Pennsylvania y profesor externo en el Instituto de Santa Fe, Nuevo México.

Para comprender la forma en que la autoorganización puede alcanzar a constituir una fuerza evolutiva resulta necesario un breve examen de los sistemas complejos. A lo largo de los dos últimos decenios, el interés por tales sistemas ha permeabilizado las ciencias de la naturaleza y de la sociedad. Tan recientes son los esfuerzos y tentativas realizados que ni siquiera se dispone aún de una definición de complejidad que posea generalidad suficiente y amplia aceptación.

Mas ciertas propiedades de los sistemas complejos sí están quedando a las claras. Ya ha prendido en la imaginación popular un fenómeno que se da en ciertos casos: la fuerza de aleatorización que el "caos" determinístico posee. Debido al caos, sistemas dinámicos no lineales que muestran al principio comportamiento regular y ordenado pueden quedar completamente desorganizados con el transcurso del tiempo. Condiciones iniciales muy similares pueden engendrar efectos marcadamente dispares. En el tiempo meteorológico, el caos queda ejemplificado por el llamado "efecto mariposa": la idea de que el batir de alas de una mariposa en Río de Janeiro puede influir en el tiempo que haga en Barcelona.

Pero, por fascinante que sea el caos, sólo constituye parte del comportamiento de los sistemas complejos. Se da también un fenómeno contrario a la intuición, el del anticaos: ciertos sistemas muy desordenados "cristalizan" espontáneamente en un elevado grado de orden. El anticaos desempeña un papel importante en el desarrollo biológico y en la evolución.

El descubrimiento del papel del anticaos en biología comenzó hace más de veinte años, cuando me propuse describir en términos matemáticos la diferenciación de un ovocito fecundado en múltiples tipos celulares. Des-



1. BUCLES DE ADN extruidos por esta bacteria: contienen miles de genes. Los genes actúan a modo de red autorreguladora, donde se activan y desactivan unos a otros. Las células superiores presentan circuitos genéticos más complejos todavía. Ciertos modelos computacionales hacen entrever la forma en que tales sistemas complejos podrían autoorganizarse para exhibir ciclos estables de actividad génica, uno de los rasgos esenciales de toda forma de vida.

de entonces, matemáticos, informáticos y especialistas en estado sólido, entre quienes se cuentan muchos colegas del Instituto de Santa Fe, en Nuevo México, han conseguido progresos sustanciales.

La biología rebosa de sistemas complejos: los millares de genes que unos a otros se regulan entre sí en el seno de las células; las redes de células y moléculas que median en la respuesta inmune; los miles de millones de neuronas de las redes nerviosas subyacentes a la conducta y al aprendizaje; las mallas de ecosistemas, repletas de especies en coevolución. De los citados, la red autorregulada que un genoma constituye (el genoma es el sistema completo de genes de un organismo) ofrece buen ejemplo de cómo el anticaos puede gobernar el desarrollo.

El genoma de los organismos superiores, el de los humanos, encierra codificada la información precisa para la elaboración de unas 100.000 proteínas distintas. Uno de los dogmas centrales de la biología del desarrollo afirma que la diferenciación en células hepáticas, neuronas y demás tipos se debe a que, en ellas, se encuentran activos diversos genes. Y, por otra parte, también es hoy sabido que todas las células de un mismo organismo contienen aproximadamente las mismas instrucciones genéticas. Los tipos de células se diferencian porque poseen patrones disímiles de actividad genética, no porque posean distintos genes.

Los genomas actúan al modo de las complejas computadoras de funcionamiento en paralelo o de las redes informáticas, en la medida en que unos genes regulan la actividad de otros, sea directamente o a través de sus productos. La diferenciación celular está precedida por la conducta coordinada de este sistema. En consecuencia, una de las tareas centrales de la biología molecular ha pasado a ser la comprensión de la lógica y la estructura del sistema de regulación genómica.

Los investigadores pueden ayudarse con modelos matemáticos para comprender más fácilmente las características de esos complejos sistemas de procesamiento en paralelo. Cada sistema complejo posee "características locales", que describen cómo se hallan concatenados los elementos del sistema y la forma en que pueden influir unos en otros. En un genoma, sea por caso, los elementos son genes. La actividad de un gen individual cualquiera se halla directamente regulada por un número limitado de otros genes o productos genéticos y sus interacciones están gobernadas por ciertas reglas.

Dado un sistema cualquiera de características locales, podríamos construir un gran conjunto —una clase— compuesto por todos los sistemas compatibles con aquéllas. Una mecánica estadística de nuevo cuño permite identificar las características medias de todos los diferentes sistemas que componen la clase. (Lo que hace la mecánica estadística tradicional, por el contrario, es promediar todos los estados posibles de un mismo sistema.) Los sistemas individuales de la clase podrían ser muy diferentes; no obstante, las conductas y estructuras estadísticamente típicas constituyen las hipótesis óptimas para la predicción de las propiedades de un sistema individual cualquiera.

El método parte de una idealización del comportamiento de cada elemento del sistema —de cada gen, en el caso de un genoma— que es traducido en una simple variable binaria (capaz de tomar uno de dos estados). Para estudiar el comportamiento de millares de elementos cuando se encuentran acoplados entre sí, me he valido de una categoría de sistemas denominados "redes booleanas aleatorias". Tales sistemas heredan su nombre de George



Boole, que inventó, en el siglo XIX, un método para el análisis algebraico de la lógica matemática.

En una red booleana cada variable está regulada por otras que operan como señales de entrada. El comportamiento dinámico de cada variable, esto es, en cuál de sus dos estados se va a encontrar en el instante siguiente, está gobernado por reglas lógicas de conmutación, a las que se denomina funciones booleanas. Una función booleana especifica la actividad que mostrará una variable en respuesta a cada una de las posibles combinaciones de actividades de las variables de entrada. Una de tales reglas es, por ejemplo, la función booleana "O", que estipula que la variable por ella gobernada estará activa cuando lo esté al menos una de sus variables de entrada. Alternativamente, la función "Y" declara que una variable solamente se tornará activa cuando la totalidad de sus variables de entrada se encuentren activas a la vez.

Es fácil calcular cuántas serían las funciones booleanas que podrían gobernar a uno cualquiera de los elementos binarios de una red. Si un elemento binario posee K entradas, el número de distintas combinaciones de señales de entrada que podría recibir es 2^K. Para cada una de estas combinaciones es preciso especificar si el resultado ha de ser activar o desactivar el elemento. Por consiguiente, un tal elemento admite en principio 2 elevado a 2^K posibles reglas booleanas de conmutación.

Las versiones matemáticamente idealizadas de los sistemas biológicos que voy a exponer se denominan redes autónomas aleatorias booleanas de tipo *NK*. Constan de N elementos concatenados, a razón de K entradas por elemento; son autónomas porque ninguna de las entradas proviene del exterior del sistema. A cada elemento le son asignadas señales de entrada, amén de una de las funciones booleanas posibles. Asignando valores a N y a K, podemos definir una colección de redes que posean las mismas características locales. Una red aleatoria es una red extraída al azar de esta colección.

Cada combinación de actividades de elementos binarios constituye un "estado" de la red. En cada estado, todos los elementos examinan el valor de sus entradas reguladoras en ese momento. Cuando el reloj de sincronización señale el instante siguiente, los elementos adoptan un estado excitado o desactivado, según determinen sus funciones individuales. (Debido a que todos los elementos actúan simultáneamente, se dice también que el sistema es síncrono.) El sistema pasa de cada estado a otro unívocamente determinado. La sucesión de estados dibuja la trayectoria de la red.

Las redes aleatorias booleanas tienen un número finito de estados. Debido a ese rasgo distintivo, el sistema habrá forzosamente de acabar asumiendo un estado ya ocupado con anterioridad. Como su comportamiento está inequívocamente determinado, el sistema procede a tomar el mismo estado sucesor que había adoptado en aquella ocasión. En consecuencia, efectuará recorridos cíclicos, periódicamente repetidos, por unos mismos estados.

Estas series cíclicas de estados se denominan atractores dinámicos de la red; en cuanto la trayectoria de la red la conduce a uno de tales ciclos, en él permanece. El conjunto de estados que fluyen hasta un ciclo o que yacen en él constituye la "cuenca de atracción" del ciclo. Toda red ha de tener, necesariamente, una serie cíclica de estados; es posible que tenga más.

Abandonada a sí misma, la red acabará instalándose en uno de sus atractores cíclicos y quedando atrapada en él. Empero, si la red sufre alguna perturbación, es posible que su trayectoria cambie. Dos son los tipos de perturbación que interesa mencionar aquí: las perturbaciones minimales y las perturbaciones estructurales.

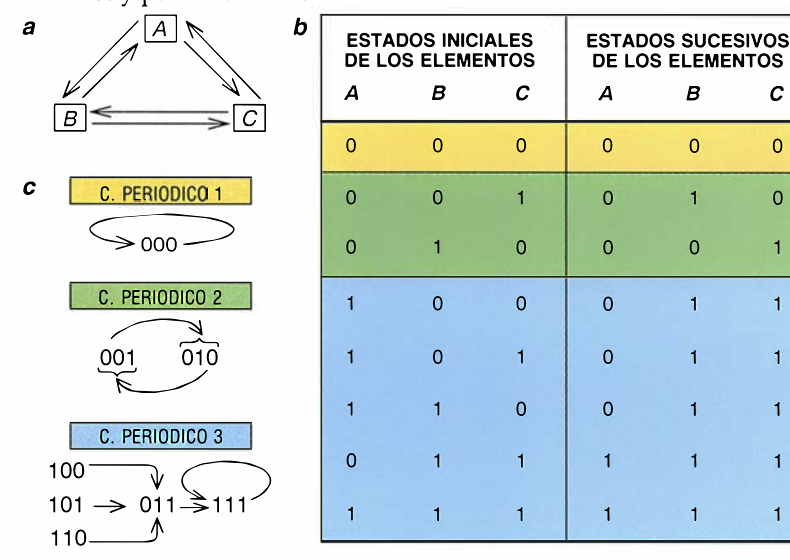
Una perturbación minimal consiste en un cambio transitorio en el estado de uno de los elementos binarios, durante el cual dicho elemento pasa al estado de actividad opuesto. Si tal cambio no saca a la red al exterior de su cuenca de atracción original, la red acabará retornando al ciclo de estados original. Pero si el cambio la arrastra hasta una cuenca de atracción diferente, la trayectoria de la red cambiará: fluirá hasta un nuevo estado de ciclos e iniciará un comportamiento recurrente nuevo.

Funciones booleanas y ciclos de estados

Las funciones booleanas son reglas lógicas que describen la forma en que responderán los elementos binarios de las redes (elementos que pueden adoptar uno de dos estados) ante las combinaciones de señales procedentes de otros elementos. Aplicando a una red la lógica de Boole, podremos predecir el comportamiento del sistema.

Esta sencilla red, (*a*), consta de tres elementos, cada uno de los cuales recibe señales de los demás. El elemento *A* obedece a la función booleana Y; únicamente se torna activo si los dos elementos *B* y *C* se encontraban antes activos. Los elementos *B* y *C* obedecen a funciones O: cada uno de ellos se activa si al menos uno de los otros elementos está activo. Enumerando todas las posibles combinaciones de estados de la red es posible deducir de las funciones booleanas cuáles serán todos los estados sucesivos (*b*).

El comportamiento a largo plazo del sistema es de sencillez notable. Aunque la red puede hallarse inicialmente en cualquiera de ocho estados diferentes, acabará necesariamente estabilizándose en sólo uno de tres posibles ciclos de estados, compuesto cada uno por una sucesión de estados periódicamente repetidos (*c*). Si sólo se halla activo el elemento *B* o el *C*, el sistema oscilará cíclicamente entre los dos estados. Cualquier otro estado de la red conduce de forma inevitable a que la totalidad de los elementos queden activados y permanezcan así.



ESTADOS INICIALES DE LOS ELEMENTOS			ESTADOS SUCESIVOS DE LOS ELEMENTOS		
A	B	C	A	B	C
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0
0	1	0	0	0	1
1	0	0	0	1	1
1	0	1	0	1	1
1	1	0	0	1	1
0	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1

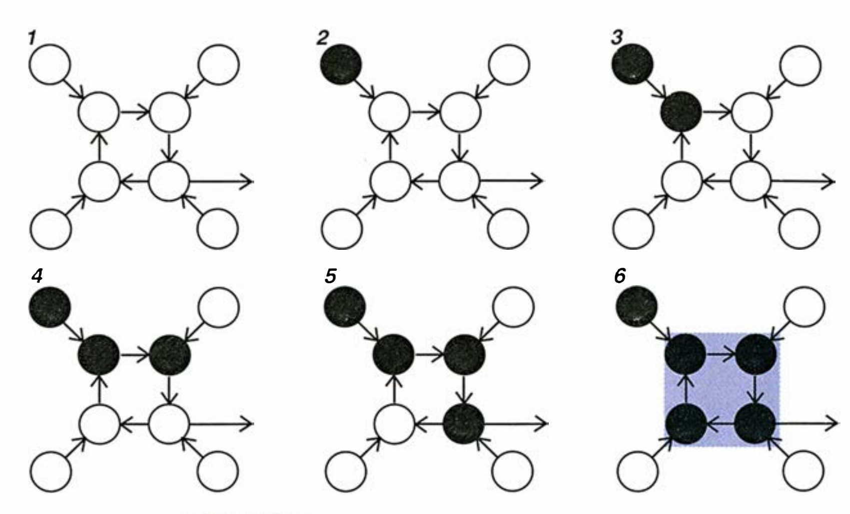
La estabilidad de los atractores, al ser sometidos a perturbaciones minimales, varía. Algunos se recobran de cualquier perturbación individual, mientras que a otros los desestabiliza cualquier perturbación. Puede suceder que la inversión de actividad de uno solo de sus elementos desencadene una avalancha de cambios en las regularidades que, de no ser por ella, se habrían producido. Los cambios suponen "daños" y pueden propagarse en diverso grado por la red.

Una perturbación estructural consiste en una mutación permanente de las conexiones o de las funciones booleanas de una red. Entre tales perturbaciones podríamos contar el intercambio de las entradas de dos elementos o la sustitución de la función O de un elemento por una función Y. Lo mismo que las perturbaciones minimales, las estructurales pueden ser causa de daños, y variar la estabilidad de las redes para resistirlas.

Al ir modificando los parámetros que describen un sistema booleano complejo, se altera también el comportamiento del sistema: el sistema puede cambiar de la conducta caótica a la conducta ordenada. Un tipo de sistema cuya comprensión resulta quizá sorprendentemente fácil es aquel en que el número de entradas de cada elemento es igual al número total de elementos, o dicho de otro modo, en el que todo está conectado con todo lo demás. (Tales sistemas se denominan "redes $K = N$".) Dado que una red aleatoria $K = N$ es maximalmente desordenada, el estado sucesor de cada estado resulta ser completamente aleatorio. La red se comporta caóticamente.

Un signo del desorden de los sistemas $K = N$ es que, al crecer el número de elementos, la longitud de los ciclos repetitivos crece exponencialmente. Por ejemplo, una red $K = N$ que conste de 200 elementos tiene 2^{200} (unos 10^{60}) estados distintos. La longitud media de los ciclos de estado de la red es, aproximadamente, la raíz cuadrada de tal número, o sea, que constan de unos 10^{30} estados. Aun cuando la transición de un estado a otro exigiera tan sólo un microsegundo, haría falta un tiempo millones de veces mayor que la edad del universo para recorrer completamente su atractor.

Las redes $K = N$ exhiben además una sensibilidad máxima a las condiciones iniciales. Dado que el sucesor de cada estado es esencialmente aleatorio, prácticamente todas las perturbaciones que invirtiesen el estado de un elemento alterarían de forma drástica la trayectoria subsiguiente de la red. Así pues, es típico que cambios minimales provoquen casi de inmediato grandes daños (alteraciones en las pautas de actividad). En vista de que tales sistemas exhiben una sensibilidad extrema a los cambios en sus condiciones iniciales y en razón de que la longitud de sus ciclos periódicos crece exponencialmente, los caracterizaré como sistemas caóticos.



2. ELEMENTOS "CONGELADOS", incapaces de cambiar de estado, pueden surgir a veces en un sistema. En esta sencilla red de muestra todos los elementos están gobernados por funciones booleanas "O"; inicialmente se encuentran desactivadas. En cuanto se activa uno de los elementos (*negro*), el sistema experimenta una cascada de cambios. A causa de la configuración de la red y del tipo de funciones booleanas que intervienen en ella, ciertos elementos (*azul*) quedan "congelados" en estado activo, a cuyo estado retornarán, aun cuando se alteren ellos o una de sus entradas.

No obstante, a pesar de estos rasgos de conducta caótica, los sistemas $K = N$ sí exhiben un asombroso signo de orden: el número de posibles ciclos de estados (y de cuencas de atracción) resulta muy pequeño. El número esperado de ciclos es igual al número de elementos dividido por el número e, base de los logaritmos naturales. Por ejemplo, un sistema compuesto por 200 elementos y 2^{200} estados, tendría solamente unas 74 pautas de comportamiento distintas.

Además, alrededor de dos terceras partes de todos los estados posibles caen en las cuencas de apenas unos cuantos atractores, y en ocasiones de uno solo. La mayoría de los atractores no reclaman para sí muchos estados. La estabilidad de un atractor es proporcional al tamaño de su cuenca, o sea, del número de estados situados sobre trayectorias que "desaguan" en atractor. Los atractores grandes son estables frente a muchas perturbaciones, mientras que los pequeños, por lo común, son inestables.

Las características caóticas estructurales y conductuales recién expresadas no son exclusivas de las redes $K = N$. Persisten hasta cuando K (el número de entradas por elemento) decrece más o menos hasta 3. Cuando K cae a 2, sin embargo, las propiedades de las redes booleanas aleatorias experimentan un cambio abrupto: las redes exhiben un orden colectivo inesperado y espontáneo.

En las redes $K = 2$, tanto el número como las longitudes de los ciclos periódicos caen a tan sólo la raíz cuadrada del número de elementos, aproximadamente. Los ciclos periódicos de los sistemas $K = 2$ permanecen estables frente a la casi totalidad de perturbaciones minimales y las perturbaciones estructurales sólo alteran ligeramente su conducta dinámica. (Las redes con una sola entrada por elemento constituyen una clase ordenada especial. Su estructura degenera en bucles de realimentación aislados, que no interactúan.)

Han pasado más de 20 años desde que descubrí estas características de las redes aleatorias y todavía siguen sorprendiéndome. Si tuviéramos que examinar una red de 100.000 elementos, cada uno de los cuales recibe sólo dos entradas, su diagrama de interconexiones sería una auténtica maraña, desmesuradamente compleja. El sistema podría asumir nada menos que $2^{100.000}$ (unos $10^{30.000}$) estados distintos. Y sin embargo, en tal sistema el orden haría aparición espontáneamente; el sistema se estabilizaría en alguno de los 370 ciclos de estados periódicos. Si cada transición exigiese un microsegundo, esa red de tipo $K = 2$ recorrería su diminuto atractor en cosa de unos 370 microsegundos —bastante menos que los miles de millones de veces la edad del universo que la red caótica $K = N$ exige.

En el régimen ordenado de redes con dos o menos entradas por elemento, la sensibilidad a las condiciones iniciales es escasa: la mariposa duerme. En el régimen caótico, las redes

divergen al poco de partir de estados muy similares; pero en el régimen ordenado, estados similares tienden a converger muy pronto en unos mismos estados sucesores.

Consecuentemente, en las redes aleatorias con sólo dos entradas por elemento cada atractor es estable frente a casi todas las perturbaciones minimales. Análogamente, casi todas las mutaciones de tales redes sólo alteran levemente los atractores. El régimen de red ordenada está, pues, caracterizado por una cualidad homeostática: lo típico es que las redes retornen a sus atractores originales tras las perturbaciones. Y la homeostasis, como expondré seguidamente, es una propiedad común a todos los seres vivos.

¿Por qué exhiben un orden tan profundo las redes aleatorias con dos entradas por elemento? La respuesta básica parece ser que desarrollan un núcleo "congelado", o sea, una malla conexa de elementos que están efectivamente enclavados en uno de sus dos estados, sea el activo o el pasivo. El núcleo congelado crea muros entrelazados de invariancia que se "infiltran" y propagan a través de todo el sistema. A resultas, el sistema queda fragmentado en un núcleo congelado invariable y en islas de elementos cambiantes. Dichas islas se hallan funcionalmente aisladas; los cambios en las actividades de una isla no pueden propagarse hasta otras islas a través del núcleo helado. Considerado como un todo, el sistema se torna ordenado porque las alteraciones de su conducta han de permanecer pequeñas y localizadas. La baja conectividad constituye, pues, una condición suficiente para que surja una conducta ordenada en sistemas de conmutación desordenados.

Tal condición no es, sin embargo, necesaria. También surgirá el orden en redes de elevada conectividad si las funciones booleanas de conmutación presentan ciertos sesgos. Unas funciones booleanas efectúan la activación en mayor proporción que lo contrario, o viceversa. Por ejemplo, una función O activa el elemento que controla en tres de las cuatro combinaciones posibles de sus entradas binarias.

Cierto número de físicos especialistas en estado sólido, entre quienes se cuentan Dietrich Stauffer, de la Universidad de Colonia, y Bernard Derrida y Gerard Weisbuch, de la Ecole Normale Supérieure de París, han estudiado los efectos del sesgo en las funciones booleanas. Han descubierto que, si el grado de sesgo excede de un valor crítico, empiezan a concatenarse entre sí y propagarse por la red "cúmulos de homogeneidad" constituidos por elementos en estado congelado. El comportamiento dinámico de la red se torna una telaraña de elementos congelados y de islotes, funcionalmente aislados, de elementos cambiantes.

Tal orden, desde luego, se asemeja mucho al que he descrito para redes de baja conectividad. Lo típico es que las inversiones transitorias de actividad de un elemento aislado no trasciendan los confines de una isla desconectada de las demás, no pudiendo por ello causar grandes daños. Por contraste, si el nivel de sesgo está bastante por debajo del valor crítico —como sucede en los sistemas caóticamente activos— se produce la dispersión por toda la red de una maraña de elementos fluctuantes, que dejan sólo pequeños islotes de elementos congelados. En estos sistemas, bastan pequeñas perturbaciones para causar avalanchas de daños que pueden alterar el comportamiento de casi todos los elementos descongelados.

Christopher Langton, experto en informática del Laboratorio Nacional de Los Alamos, ha ideado una analogía que nos ayudará a comprender mejor la transición entre orden y desorden en diferentes colecciones de redes. Langton ha relacionado el comportamiento de las redes con las fases de la materia: las redes ordenadas son sólidas; las caóticas, gaseosas, y las redes en estado intermedio, líquidas. (Como es obvio, la analogía no debe tomarse al pie de la letra; los verdaderos líquidos constituyen una fase peculiar y propia de la materia y no un mero régimen transitorio entre gases y sólidos.)

Si en una red ordenada se rebaja el sesgo o polarización de las funciones hasta un punto próximo al valor crítico, resulta posible "fundir" ligeramente los elementos congelados. En los sistemas al borde del caos emergen comportamientos dinámicos interesantes. En dicha transición de fase coexistirían islas no congeladas, lo mismo grandes que pequeñas. Las perturbaciones minimales provocan multitud de pequeñas avalanchas y algunas avalanchas grandes. De esta forma, las distintas localidades de una red podrían comunicarse entre sí —esto es, influir unas en el comportamiento de otras— de acuerdo con una distribución de ley potencial: los emplazamientos próximos se comunican frecuentemente a través de muchas avalanchas pequeñas; las localidades distantes se comunican mucho menos frecuentemente y por medio de las raras avalanchas grandes.

Las características descritas animaron a Langton a sugerir que las redes de procesamiento en paralelo situadas al borde del caos podrían ser capaces

ESTADO INICIAL DE LA RED

$K = 2$, SESGO ELEVADO

$K = 3$, SESGO BAJO

RED "SOLIDA"

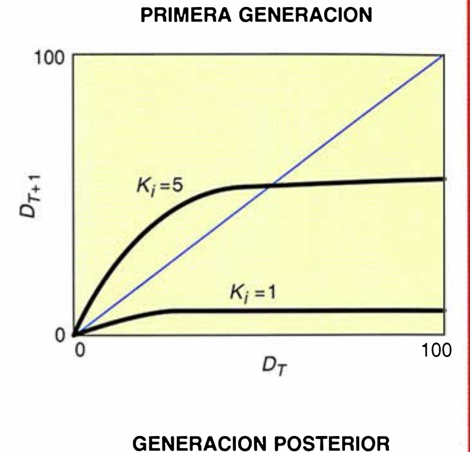
RED "GASEOSA"

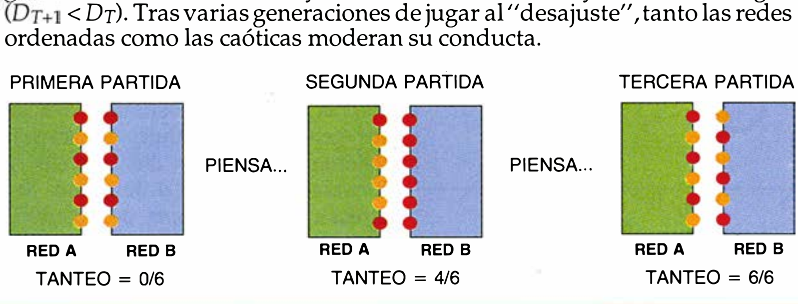
3. CAMBIOS DE FASE entre los estados "sólido" y "gaseoso" que pueden darse en redes autorreguladas, según sus características locales. Si las funciones booleanas de los elementos están sesgadas, o si cada elemento tiene tan sólo dos entradas ($K = 2$), redes en las cuales todos los elementos podían inicialmente variar acabarán tornándose estables, o sea, "sólidas". Dichos sistemas ordenados constan de un gran tejido de elementos congelados (*azul*) y de islotes aislados de elementos variables (*rojo*). Si las funciones boolenas son insesgadas o si la interconectividad de los elementos es elevada ($K > 3$), el sistema se torna "gaseoso" y se conduce caóticamente; sólo permanecerán congelados islotes compuestos por pequeño número de elementos.

El juego de desajuste

Un juego computarizado pone de manifiesto de qué forma puede la selección natural impulsar a las redes aleatorias hasta casi lindar con el caos. Las redes, jugando por parejas, reciben elevadas puntuaciones por tener en seis de sus elementos –los "puntos de ajuste"– configuraciones maximalmente dispares. Efectuada una comparación, cada red recibe como entrada la configuración correspondiente a los puntos de ajuste de la otra, elabora su nueva respuesta y efectúa una nueva comparación [*véase al pie*]. Al cabo de 10 comparaciones, cada red busca una nueva oponente. Para formar la nueva generación se da preferencia a las redes que consigan las puntuaciones más altas. Mutaciones ocasionales alteran al azar las características locales de las redes. Por lo general, tras varias generaciones, las redes mejoran sus puntuaciones en el juego. Y con independencia de sus condiciones iniciales, las redes se aproximan a la divisoria entre orden y caos.

Los cambios descritos se observan midiendo la forma en que las trayectorias de las redes divergen o convergen en diversos momentos. D_T es el porcentaje de los elementos que poseen diferentes actividades en dos estados iniciales de la red; D_{T+1}, el porcentaje medido para los estados sucesores. Cuando D_T es pequeño en redes muy caóticas ($K_i = 5$), las trayectorias divergen ($D_{T+1} > D_T$). En redes muy ordenadas ($K_i = 1$), las trayectorias convergen ($D_{T+1} < D_T$). Tras varias generaciones de jugar al "desajuste", tanto las redes ordenadas como las caóticas moderan su conducta.





de efectuar cómputos extremadamente complejos. A primera vista, la idea es plausible. Las redes caóticas en alto grado serían tan desordenadas, que resultaría difícil mantener el control de las conductas complejas. Las redes con elevada ordenación se encuentran demasiado congeladas para alcanzar a coordinar comportamientos complejos. Ahora bien, a medida que se funden los componentes congelados, van resultando factibles dinámicas más complicadas que suponen la coordinación compleja de actividades por toda la red. La complejidad que una red es capaz de coordinar alcanza su grado máximo en la transición líquida entre los estados sólido y gaseoso.

Es posible también que los sistemas situados en la transición líquida posean especial relevancia en lo atinente a la evolución, porque al parecer poseen una óptima capacidad evolutiva. Como Darwin nos enseña, las mutaciones y la selección natural pueden perfeccionar un sistema biológico merced a la acumulación de una serie de pequeñas variaciones sucesivas, al igual que los retoques de detalle pueden mejorar una tecnología. Empero, no todos los sistemas poseen la capacidad de adaptarse y mejorar por ese modo. Los complejos programas hoy instalados en nuestros ordenadores mal pueden evolucionar por mutaciones al azar; prácticamente todo cambio que se efectúe en su código alterará sin remedio la computación. Cuanto más comprimido se halle el código, menor es su capacidad de evolución.

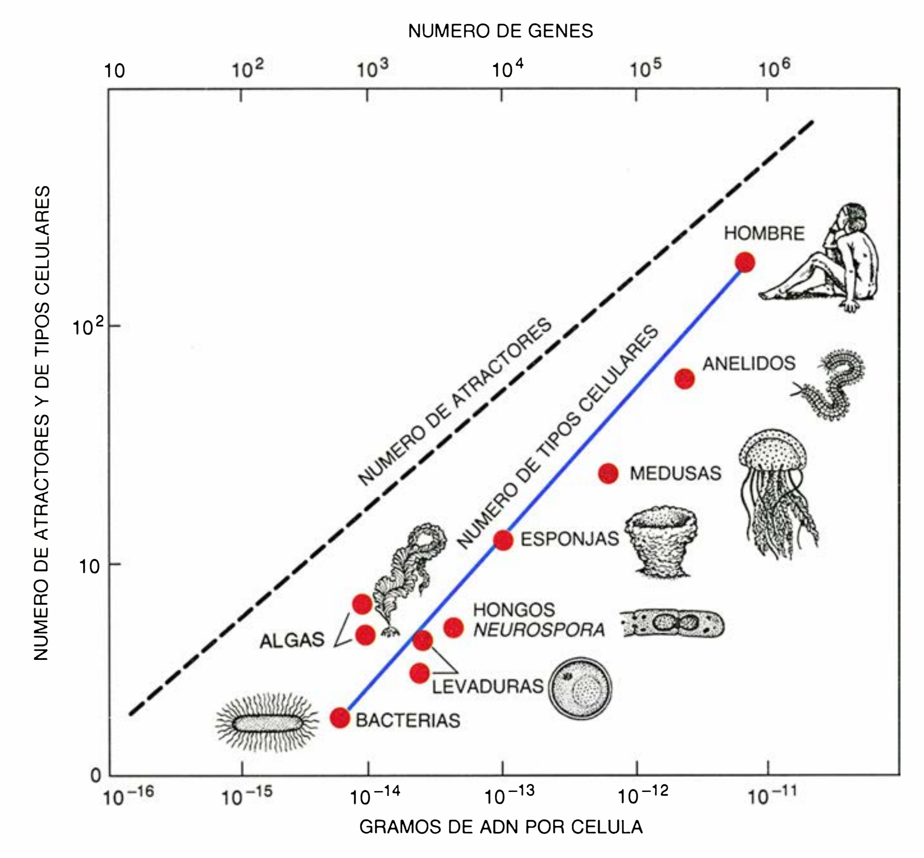
Las redes situadas en la frontera entre el orden y el caos pueden poseer la versatilidad suficiente para adaptarse con rapidez y éxito por acumulación de variaciones útiles. En dichos sistemas umbrales, la mayor parte de las mutaciones tienen escasa importancia, a causa de la naturaleza homeostática del sistema. No obstante, unas cuantas mutaciones provocan grandes cascadas de cambios. Consiguientemente, los sistemas umbrales propenden por lo común a adaptarse de manera gradual ante un ambiente cambiante; mas, en ocasiones y si es preciso, pueden cambiar rápidamente. Dichas propiedades son observables en los organismos.

Si las redes booleanas de procesamiento en paralelo situadas en la línea de frontera son las que alcanzan a adaptarse más rápida y fácilmente, podrán ser el objetivo inevitable de la selección natural. La capacidad para sacar partido de la selección natural sería, en tal caso, uno de los primeros rasgos que resultarían seleccionados.

Se trata de una hipótesis osada, hermosa incluso; pero, ¿es correcta? Puede que el físico Norman H. Packard, de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, haya sido la primera persona en preguntarse si la selección podría llevar a redes booleanas de procesamiento en paralelo hasta el umbral del caos. La respuesta es afirmativa, al menos en ocasiones. Packard halló que tal evolución se producía en una población de redes booleanas sencillas y seleccionadas por su capacidad para realizar un cómputo específico sencillo: los autómatas celulares.

Recientemente, con mi colega Sonke Johnsen, de la Universidad de Pennsylvania, he descubierto pruebas adicionales de evolución que prosigue hasta el umbral del caos. Para estudiar la cuestión hemos comenzado por hacer que las redes booleanas lleven a cabo una variedad de juegos unas contra otras. Nuestros resultados sugieren, igualmente, que la transición entre caos y orden puede constituir un atractor para la dinámica evolutiva de redes capaces de una gama de tareas sencillas y complejas. La totalidad de las poblaciones de redes mejoraron su rendimiento en los juegos antes de lo que el mero azar hubiera podido conseguir. También evolucionó la organización de las redes de más éxito: sus conductas progresaron hacia el umbral entre orden y caos.

Si tales resultados logran soportar un escrutinio más fino, es posible que



4. EL NUMERO DE TIPOS CELULARES de los organismos parece guardar una relación matemática con el número de genes del organismo. En este diagrama se ha supuesto que el número de genes es proporcional a la cantidad de ADN que la célula contiene. En el caso de que los sistemas reguladores génicos sean redes $K = 2$, el número de atractores de un sistema es la raíz cuadrada del número de genes. El número real de tipos de células de diversos organismos parece crecer correlativamente con el aumento de ácido desoxirribonucleico.

la transición líquida entre las organizaciones caótica y ordenada constituya el objetivo característico de selección para los sistemas capaces de coordinar tareas complejas y de adaptarse. Según este razonamiento, debería haber en biología sistemas umbrales como los descritos.

¿Cuánto orden y cuánto caos exhiben los sistemas genómicos de los virus, las bacterias, las plantas y los animales? Por lo común, cada gen está directamente regulado por unos pocos genes o moléculas, posiblemente no más de 10. El diagrama de conexionado booleano correspondiente no es, pues, demasiado enmarañado y los elementos que componen el gen tienen pocas entradas. Además, casi todos los genes regulados hoy conocidos se hallan gobernados por funciones canalizadoras, una clase particular de reglas booleanas de conmutación. En las funciones canalizadoras hay cuando menos una entrada capaz de determinar, por sí sola, la actividad del elemento regulado. (La función O es una función de canalización típica.)

Lo mismo que en los casos de baja conectividad o de sesgos en las funciones booleanas, cuando una red abunda en funciones de canalización puede crearse en ella un extenso núcleo congelado. Por tanto, al aumentar la proporción de funciones canalizadoras utilizadas en una red, el sistema puede verse conducido hacia una transición de fase entre el caos y el orden. Dado que los sistemas genómicos reguladores están parcamente conectados y parecen hallarse gobernados por funciones canalizadoras, es muy verosímil que tales sistemas exhiban rasgos propios de sistemas de procesamiento en paralelo con elementos congelados que se infiltran por doquier: un número modesto de atractores pequeños y estables; confinamiento de los daños a pequeñas cascadas y avalanchas, y también modestas alteraciones de la dinámica en respuesta a las mutaciones.

Particular relevancia para la biología tiene una de las interpretaciones del significado del anticaos en los sistemas complejos, a saber: un tipo celular puede corresponder a un atractor de la dinámica genómica. Un genoma que contenga 100.000 genes posee potencial para no menos de $10^{30.000}$ pautas de expresión génica. La red genómica reguladora orquesta estas potencialidades en pautas variables a lo largo del tiempo de actividad génica. Mas los tipos estables de células persisten en expresar conjuntos limitados de genes. La presunción natural es que un tipo celular se corresponde con un atractor compuesto por una secuencia cíclica de estados, que un tipo celular da cuerpo a un ciclo de expresión francamente estable dentro de un conjunto específico de genes.

En el marco de esa interpretación, el orden espontáneo que surge en las redes con baja conectividad o dotadas de funciones booleanas de canalización establece diversas predicciones acerca de los sistemas biológicos reales. En primer lugar, cada tipo celular ha de corresponder a un número muy pequeño de pautas de expresión génica que va recorriendo cíclicamente. Podemos, pues, calcular cuál habría de ser la longitud de dichos ciclos.

Tras recibir un estímulo adecuado, los genes de las células eucariotas requieren entre uno y diez minutos para tornarse activos. La longitud de un atractor en un genoma de 100.000 genes sería de unos 370 estados. Consiguientemente, la célula recorrería la totalidad de las pautas de expresión génica de su tipo en un tiempo comprendido entre 370 y 3700 minutos. Tales cifras se aproximan a la gama correcta de valores correspondientes a sistemas biológicos reales. Como se predijo, la longitud de los ciclos celulares parece ser aproximadamente igual a la raíz cuadrada de la cantidad de ADN en las células de las bacterias y de los organismos superiores.

Suponiendo que un tipo celular equivalga a un atractor, tendría que ser factible predecir cuántos tipos de células aparecerán en un organismo. El número de atractores ronda en torno a la raíz cuadrada del número de elementos de la red; así pues, el número de tipos celulares debería ser, más o menos, la raíz cuadrada del número de genes. Si suponemos que el número de genes es proporcional a la cantidad de ADN de la célula, los humanos deberían tener alrededor de 100.000 genes y unos 370 tipos celulares. Según el recuento más reciente, los humanos tienen unos 254 distintos tipos de células, así que las predicciones también se encuentran en el orden de magnitud correcto.

En muchos phyla, el número de tipos celulares parece crecer aproximadamente con la raíz cuadrada del número de genes por célula (es decir, con el número de genes elevado a un exponente fraccionario que ronda en torno a un medio). Resulta así que las

bacterias tienen uno o dos tipos; las esponjas, entre 12 y 15, y los anélidos, alrededor de 60.

Dado que no todo el ADN posee una función determinada, es posible que el número de genes no crezca en razón directa de la cantidad de ADN. El número predicho de tipos celulares podría entonces obedecer a un exponente fraccionario mayor que un medio (crecer más rápidamente que la raíz cuadrada), aunque menor que uno. De hecho, según estimaciones prudentes, el número de tipos celulares parece crecer, a lo sumo, según una función lineal. Hallamos en las redes booleanas complejas este abanico de comportamientos. Por contraste, otros modelos matemáticos sencillos para sistemas genómicos predicen que el número de tipos celulares habría de crecer exponencialmente con el número de genes.

Otra de las predicciones atañe a la estabilidad de los tipos celulares. Si un tipo de célula es un atractor, serán pocas las perturbaciones que puedan alterarlo: su estabilidad es una propiedad emergente del sistema de regulación de los genes.

En virtud de este modelo, la diferenciación sería una respuesta a perturbaciones que arrastrasen la célula a la cuenca de atracción de otro tipo celular. No obstante, en un ensamblaje canalizador, cada célula modelo sólo puede diferenciarse directamente en unos cuantos otros tipos celulares, porque cada atractor sólo se encuentra "cerca" de unos pocos. En consecuencia, el desarrollo ontogenético a partir de un huevo fertilizado debería proceder en sucesivas sendas de diferenciación que se van bifurcando. Dicho de otro modo, en cuanto una célula ha comenzado a diferenciarse según ciertas directrices, pierde la opción de diferenciarse en otras. Que los biólogos sepan, la diferenciación celular de los organismos pluricelulares ha estado fundamentalmente constreñida y organizada a través de sucesivas sendas y ramificaciones desde el período cámbrico, hace casi 600 millones de años.

El orden emerge en las redes de canalización debido a que una gran proporción de los elementos binarios caen en estados estables, congelados. Ese núcleo estable de elementos es idéntico en la casi totalidad de los atractores. Por consiguiente, todos los tipos celulares de un organismo deberían expresar, en buena parte, los mismos genes; la situación típica sería que tan sólo un pequeño porcentaje de los genes mostrase actividades diferentes. Ambas afirmaciones son verdaderas para los sistemas biológicos.

El modelo del atractor para tipos celulares predice también que la mutación de un solo gen debería tener por lo general efectos limitados. Las avalanchas de daños (o de actividad alterada) provocadas por la mutación no deberían propagarse por la mayoría de los genes de la red reguladora. Las alteraciones de actividad deberían hallarse restringidas a pequeños islotes, reducidos y desconectados. Los sistemas genéticos reales cumplen tales expectativas.

Además, los tamaños esperados de las islas descongeladas de los sistemas génicos alcanzan casi a predecir los tamaños de tales avalanchas. Por ejemplo, una de las hormonas de *Drosophila* (mosca de la fruta) conocida por ecdisona puede desencadenar una cascada que cambia la actividad de unos 150 genes de un total de al menos 5000. El tamaño esperado de las avalanchas en los genomas canalizantes con 5000 elementos, o en los sistemas con baja conectividad dotados de un núcleo helado que contenga más o menos el 80 por ciento de los genes, ronda en torno a 160.

En cuanto modelos de sistemas genómicos, los sistemas situados en el umbral entre orden y caos remedan de cerca muchas características de la diferenciación celular durante la ontogenia, características que son comunes a los organismos que han venido divergiendo evolutivamente a lo largo de más de 600 millones de años. Los paralelismos respaldan la hipótesis según la cual la evolución habría sintonizado los sistemas reguladores de los genes hasta conducirlos hacia la región ordenada y, tal vez, hasta las cercanías de la frontera divisoria entre orden y caos. Si las hipótesis descritas se van consolidando, los biólogos podrían contar con los primeros mimbres de una teoría universal de la organización genómica, de la conducta y de la capacidad para evolucionar.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

PHASE-TRANSITIONS IN TWO DIMENSION-AL KAUFFMAN CELLULAR AUTOMATA. B. Derriba y D. Stauffer en *Europhysics Letters*, vol. 2, n.º 10, págs. 739-745; 1986.

RANDOM BOOLEAN NETWORKS: ANALOGY WITH PERCOLATION. D. Stauffer en *Philosophical Magazine* B, vol. 56, n.º 6, págs. 901-916; 1987.

LECTURES IN THE SCIENCES OF COMPLEXITY. Dirigido por Daniel L. Stein. Addison-Wesley, 1989.

ORIGINS OF ORDER: SELF-ORGANIZATION AND SELECTION IN EVOLUTION. Stuart A. Kauffman. Oxford University Press (en prensa).

Microláseres

Millones de láseres con dimensiones de millonésimas de metro pueden actualmente grabarse en una sola pastilla, ofreciendo así una multitud de nuevas aplicaciones en el campo de las comunicaciones ópticas y del procesamiento de la información

Jack L. Jewell, James P. Harbison y Axel Scherer

Desde hace tiempo, los investigadores sueñan en construir un ordenador óptico, que consistiría en reemplazar los conmutadores y circuitos electrónicos por una red óptica a través de la cual unos impulsos luminosos individuales transporten y procesen la información. Esta idea no sólo presenta un atractivo estético, sino que además promete conseguir una máquina aún más rápida y versátil que los ordenadores más potentes hoy en uso.

Sin embargo, la realización de este sueño se ha visto frustrada por la carencia de procesadores de señales ópticas suficientemente diminutos. A semejanza de su equivalente electrónico, el transistor, el elemento básico de cualquier sistema óptico de procesamiento o comunicaciones debe trabajar a elevada velocidad y con bajo consumo de energía, y para conseguirlo su tamaño ha de ser muy pequeño. En la industria de la microelectrónica, es ya corriente la fabricación de cantidades que se aproximan a las decenas de millones de transistores con dimensiones inferiores a un micrometro, sobre una sola pastilla ("chip") de semiconductor. Frente a esta asombrosa hazaña, la miniaturización de los dispositivos ópticos se ha quedado bastante atrás.

Toda la tecnología óptica actualmente disponible en el mercado se encierra en un láser de diodo semiconductor, dispositivo que aparece en aplicaciones muy dispares, de los reproductores de discos compactos a los sistemas de comunicaciones por fibras ópticas. Si bien el láser de diodo ha revolucionado el almacenamiento y la transmisión de la información, el tamaño de este dispositivo y su nivel de integración resultan comparables con los de los transistores de encapsulado individual que se utilizaban en una radio de las postrimerías de los cincuenta. Un láser típico tiene algunos micrometros de anchura por varios centenares de micrometros de longitud, y, por ello, centuplica, varias veces, el tamaño de sus equivalentes microelectrónicos. Aunque estos dispositivos sean menores en varios órdenes de magnitud que los conocidos láseres rojos de helio y neon utilizados en los exploradores de código de barras de supermercados, resultan demasiado grandes para emplearse en un ordenador óptico.

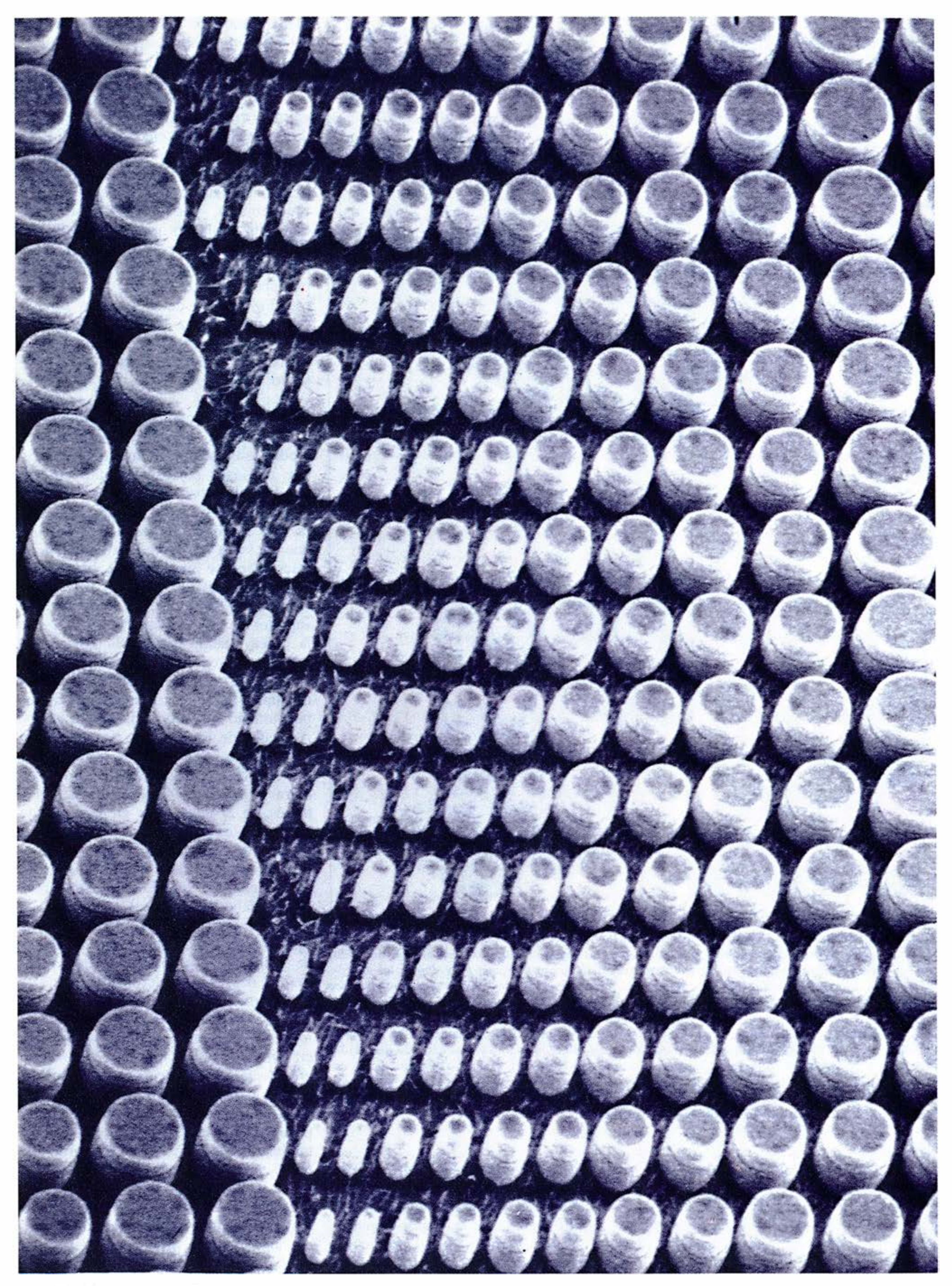
Con fecha muy reciente ha habido avances notables en la miniaturización de láseres de diodo. En mayo de 1989, en el marco de un trabajo que pretendía producir unas redes bidimensionales de conmutadores, idóneas para ordenadores ópticos, los autores de este artículo fabricaron más de un millón de microláseres (láseres con tamaños del orden de un micrometro) sobre una sola pastilla de semiconductor, aproximadamente de ocho milímetros de longitud por siete de anchura. Estos microláseres fueron concebidos por uno de nosotros (Jewell) y Sam McCall, de los laboratorios Bell de AT&T, y después producidos en Bell Communications Research (Bellcore) por los otros dos autores y Leigh Florez. Su tamaño variaba entre uno y cinco micrometros, dos órdenes de magnitud por debajo del de los láseres de diodo convencionales. Con un trabajo adicional, el tamaño probablemente podría reducirse un orden de magnitud más.

Quizá lo que resulta más excitante es la creencia de que, al acercarse el tamaño de los microláseres a su límite práctico inferior (entre la mitad y un cuarto de micrometro), el proceso mecánico cuántico de emisión de luz puede alterarse radicalmente, en un sentido que potenciará todavía más las prestaciones de estos dispositivos.

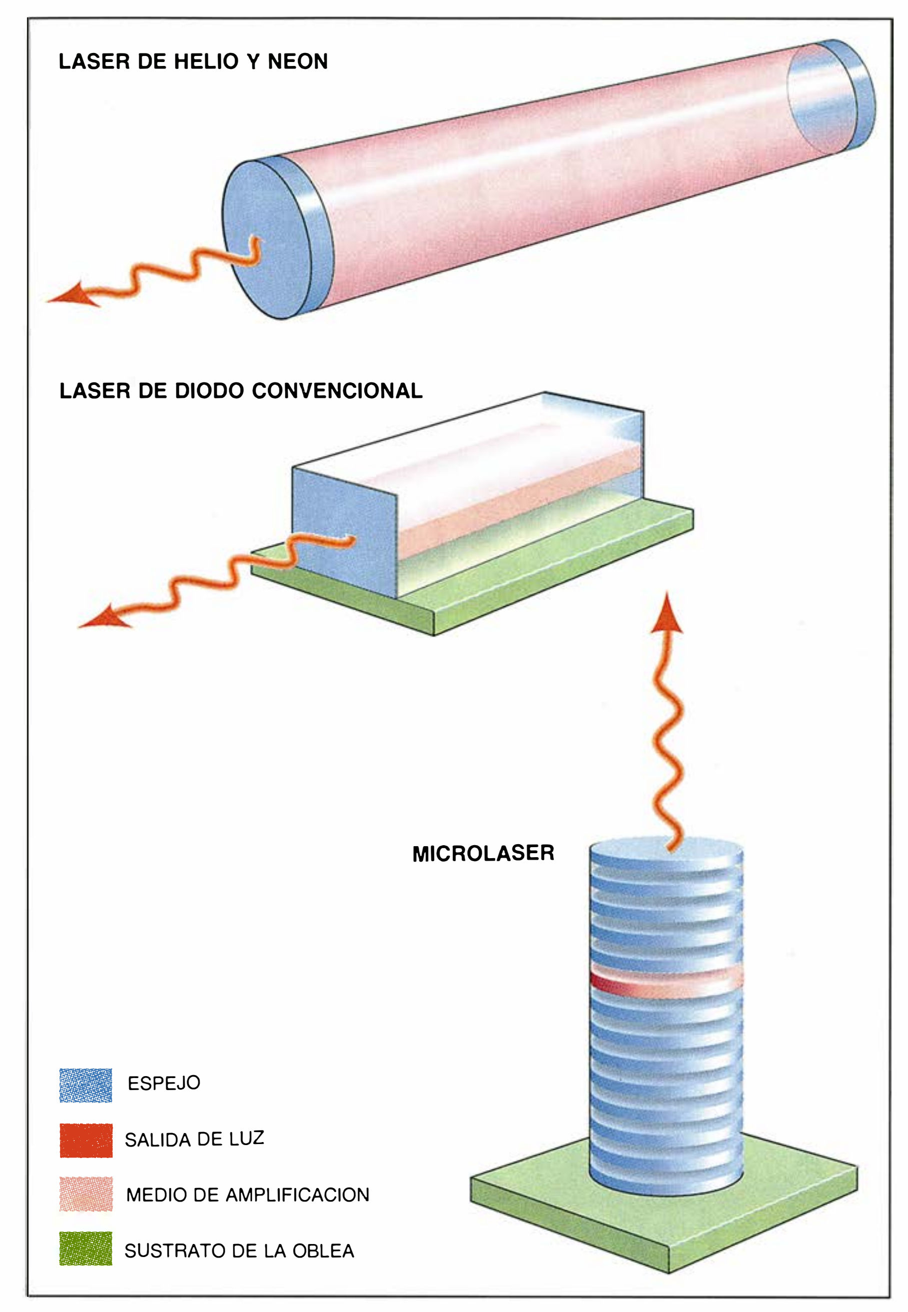
Los microláseres son tan nuevos que en este momento nadie es capaz de predecir si su desarrollo va a afectar de modo notable al mercado comercial. Por otra parte, la preparación de un ordenador óptico no resulta nada fácil. Pese a todo, los microláseres han abierto grandes expectativas por sus aplicaciones potenciales en los ordenadores ópticos, así como en comunicaciones ópticas y en procesamiento de información, en general.

Los principios en que se basa el funcionamiento de un láser de diodo son los mismos que para cualquier otro tipo de láser. Los átomos presentes en una parte del láser llamada medio de amplificación —típicamente un sólido, líquido o gas— son bombeados (dotados de una cierta energía) bien por medio de un campo eléctrico o bien por una fuente de radiación electromagnética. Cuando una onda luminosa de determinada longitud de onda se propaga a través del medio de amplificación y se encuentra con un átomo bombeado, puede inducir a este átomo a liberar la energía que posee en forma de emisión luminosa de la misma longitud de onda. Este proceso se produce con plena coherencia, es decir, ambas ondas están en fase y sus crestas y valles coinciden entre sí, por lo que la intensidad de la luz aumenta. Sendos espejos situados en el extremo del medio de amplificación delimitan una cavidad y fuerzan a que la luz se refleje repetidamente en ellos, atravesando así dicho medio un número muy elevado de veces e incrementando al máximo la citada intensidad luminosa. Al hacer que la reflectividad de uno o de ambos espejos sea inferior a la unidad, una parte de la

JACK L. JEWELL, JAMES P. HARBISON y AXEL SCHERER comparten un mismo interés por la optoelectrónica. En 1984 Jewell se doctoró en óptica por la Universidad de Arizona, y antes de cofundar Photonics Research, Inc. trabajó en los laboratorios Bell de AT&T. Harbison cursó toda su carrera, doctorado incluido, en la Universidad de Harvard. En 1977, se incorporó a los laboratorios Bell, entrando en Bellcore en el mismo año de su constitución, en 1984. Scherer, miembro del cuadro técnico de Bellcore, en 1985 se doctoró en el Instituto de Minería y Tecnología de Nuevo México.



1. LA PRIMERA RED DE MICROLASERES fue realizada por los autores en mayo de 1989. En esta fotografía se reproduce una minúscula porción de la red, que contenía más de un millón de microláseres, siendo los mayores de ellos de un diámetro aproximado de cinco micrometros, y los más pequeños, de cerca de un micrometro. De sus extremos circulares emergen haces láser, generados en todos salvo en los muy pequeños.



2. LOS PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO son los mismos para el láser convencional de helio y neón, utilizado en los lectores de códigos de barras de los supermercados (*arriba*), el láser de diodo semiconductor convencional, de los reproductores de discos compactos (*centro*), y uno de los microláseres de nuevo desarrollo (*abajo*). Los átomos del medio de amplificación (*rosa)* son bombeados (excitados) por una corriente o una radiación electromagnética. Cuando una onda luminosa que se propaga por el medio se encuentra con un átomo bombeado, puede inducirle a que se libere de su energía emitiendo una onda luminosa de la misma longitud de onda. La intensidad de la luz aumenta por efecto de sucesivas reflexiones entre dos espejos (*azul*) colocados a uno y otro extremo del citado medio. La reflectividad de uno de los espejos es menor que la unidad, y ello permite que parte de la luz intensificada escape del dispositivo en forma de haz de láser (*rojo*). Estos láseres no se han representado a escala: la longitud del láser de helio y neón es de 100 a 1000 veces la del láser, de diodo, y la de éste, a su vez, unas 100 veces la del microláser.

luz intensificada escapa de la cavidad en forma de un haz de láser.

El medio de amplificación de un láser diódico consiste en un diodo largo en forma de ladrillo; este dispositivo permite que circule libremente corriente eléctrica en un sentido pero bloquea el paso de la corriente en el sentido opuesto, y está fabricado con un material semiconductor tal como el arseniuro de galio. La longitud del medio de amplificación de un láser convencional es casi igual a la del propio láser. Los espejos citados se forman en cada uno de los extremos del "ladrillo" sin más que tallar la correspondiente oblea: la reflectividad de cada interfaz entre el semiconductor y el aire es del 30%, valor más que suficiente para el funcionamiento. Cuando se hace pasar una corriente eléctrica en dirección paralela a los espejos, el diodo se llena de electrones y huecos (átomos de semiconductor con electrones en defecto). Al cabo de poco tiempo los electrones y los huecos se recombinan, y cuando lo hacen se emite luz. Esta luz resulta intensificada por las reflexiones múltiples que su repetido paso a través del material produce en los espejos, y una parte de esta luz emerge de uno de los espejos en forma de haz de láser paralelo al sustrato de oblea subyacente, es decir, un haz que brota del borde del dispositivo.

La principal característica que diferencia al microláser del láser de diodo convencional consiste en que el haz de láser correspondiente emerge en dirección perpendicular al sustrato de la oblea, y no en dirección paralela. En lugar del aspecto de ladrillo que presenta un láser convencional, el microláser se parece más bien a un minúsculo bote de bebida, en el que el haz de láser emerge por su parte superior (o por la inferior, a través de la oblea cuando ésta es la transparente). La diferente configuración geométrica se traduce en que puede aquí montarse un mayor número de láseres por unidad de superficie de la oblea. A finales de los setenta, Kenichi Iga y sus colegas, del Instituto de Tecnología de Tokio, demostraron por vez primera la factibilidad de esta emisión a través de la superficie, en lugar de la emisión por el borde.

Nuestro propio trabajo sobre microláseres se remonta a la época del descubrimiento de Iga. Los investigadores de los laboratorios Bell fabricaron láseres de emisión de superficie disponiendo capas superpuestas de arseniuro de galio, de espesor comprendido entre un octavo de micrometro y varios micrometros, y pegando luego toda la pila formada. Para la gente sensata, la idea de convertir este procedimiento en una tecnología de interés práctico era absurda; el proceso rozaba los límites de la magia negra y la calidad de los dispositivos fabricados era muy pobre, "atributos" que por otra parte también caracterizaban a los primeros transistores.

La situación cambió tras una serie de perfeccionamientos. En la actualidad, la longitud de un microláser típico, incluidos los espejos, es del orden de seis micrometros, frente a los 250 de un láser diódico convencional. Pero lo que realmente le confiere el carác-

ter de “micro” es el hecho de que su geometría en forma de bote actúe como guíaondas: una especie de “manguera” óptica que impide la dispersión de la luz fuera de su dirección de propagación, como el bien conocido guíaondas óptico que es la fibra óptica. El diámetro típico de un microláser, anteriormente mencionado, es de algunos micrometros.

Aunque los microláseres todavía se encuentran en la infancia, su pequeño tamaño hace que su consumo de energía sea comparable al de los láseres de diodo más experimentados. Un valor tomado como índice para caracterizar las exigencias de energía de cualquier láser de diodo es la corriente de umbral, es decir, la intensidad de corriente necesaria para que se inicie el efecto láser en el diodo. El umbral más bajo conseguido para un microláser es de 0,7 miliampères, frente al umbral de 0,5 miliampères de un láser de diodo convencional. Avanzando más el desarrollo, se confía en que el umbral de los microláseres se pueda reducir, dada su excepcionalmente pequeña dimensión, hasta algunas millonésimas de ampère. En la actualidad, los microláseres todavía se quedan algo atrás con respecto a los láseres convencionales en cuanto a la velocidad binaria, es decir, el número de ceros y unos que se generan por segundo. Para velocidades del orden de cinco mil millones de bits por segundo (5 Gbit/s), los microláseres actuales son menos rápidos que los mejores láseres de diodo, aunque se espera alcanzar finalmente velocidades cercanas a los 100 Gbit/s.

¿Cómo se construyen estos láseres tan diminutos y con prestaciones tan elevadas? Dos técnicas cruciales lo hacen posible, siendo la primera de ellas la epitaxia de haz molecular. Con esta técnica se consigue que el material básico de cada láser se vaya formando a partir de una serie de capas de materiales semiconductores, añadidas una a una. A continuación, pueden estamparse simultáneamente gran cantidad de

Fabricación y pruebas del primer microláser

Jack Jewell (uno de los autores del artículo y creador del dispositivo) nos relata cómo vivió esta fascinante experiencia.

Tras varios meses de planificación y diseño, Axel Scherer tomó la oblea de láser de manos de Leigh Florez, quien había hecho crecer esa estructura en colaboración con Jim Harbison, mediante la epitaxia de haz molecular. La oblea medía unos cinco centímetros de diámetro pero su espesor era tan sólo de cinco milímetros, y la transportamos con todas las precauciones imaginables hasta el laboratorio de Axel, pese a lo cual a los cinco minutos el frágil disco se nos había roto en muchos pedazos de formas y tamaños diferentes. Axel y yo nos miramos el uno al otro y no pudimos contener la risa: al fin y al cabo, nuestros planes eran dividir cuidadosamente la oblea en fragmentos menores y la mala suerte nos había ahorrado tiempo.

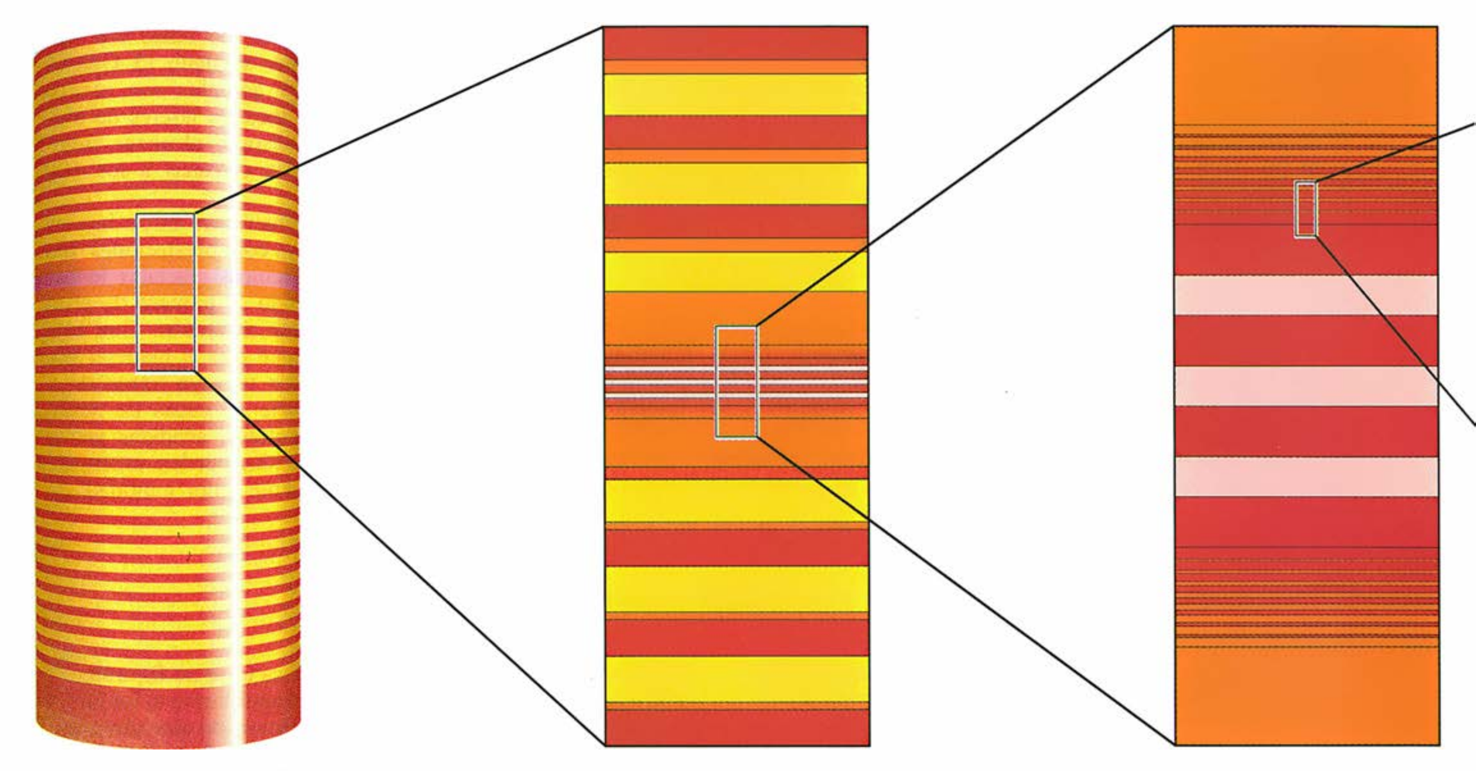
Recogimos los pedazos grandes y empezamos a trabajar con ellos. A medianoche, cuando ya podíamos comenzar a grabar los microláseres sobre esos fragmentos, la desgracia intervino de nuevo en favor nuestro. Axel me dijo que un módulo importante del aparato de grabación, denominado neutralizador, no funcionaba y no podía ser reparado. Como el neutralizador nos sonaba a artilugio de la “Guerra de las Galaxias”, decidimos que su papel no era importante y que podíamos prescindir del mismo. A las dos de la madrugada, Axel había grabado ya varios de nuestros láseres y procedimos a observarlos con el microscopio electrónico. Las experiencias anteriores indicaban que podían funcionar muy bien dispositivos de horroroso aspecto, mientras que otros mucho más atractivos no habían funcionado en absoluto, y además todos coincidíamos en que los nuestros no soportarían la prueba. La etapa final de la fabricación consistía en colocar unos contactos eléctricos sobre los extremos de los dispositivos, pero nos era forzoso esperar hasta el día siguiente porque sabíamos que sólo había una persona capaz de hacer este trabajo con éxito: Ray Martin, de Bellcore también.

Tras un sueño breve y reparador, pedimos a Ray que soldara los contactos en su posición adecuada. En ese momento empezó la angustia. Nos acercábamos rápidamente a la fase de transición entre una fabricación esperanzada y las pruebas finales, que sin duda arrojarían fallos y nos obligarían a corregirlos durante meses. No nos consolaba mucho el saber que casi todos los que conocían nuestros propósitos nos creían algo locos. Mi esposa (que no figuraba entre esas personas) me llamó para preguntarme si los láseres funcionaban, y le contesté malhumorado que aún no habíamos tenido tiempo de probarlos y que de todos modos no iban a funcionar.

Para probar los láseres, había que tocar los extremos con una sonda eléctrica parecida a una aguja. El intento de aplicar una corriente eléctrica a estos dispositivos en un laboratorio de óptica era una experiencia nueva para mí, que he dedicado toda mi carrera a la óptica, y por supuesto realizar tal operación con láseres de cinco micrometros de altura y de uno a cinco micrometros de diámetro no era tarea de principiantes. Axel y yo nos persuadimos de que, como estábamos intentando tantas cosas nuevas a la vez, cualquier cosa que sucediera nos serviría al menos para aprender algo. Al tocar con la sonda uno de los dispositivos más largos, vimos que la corriente circulaba en uno de los sentidos, y no en el otro. ¡Bravo! al menos ese dispositivo se comportaba como diodo. A continuación, utilizamos una cámara de televisión para comprobar si se emitía la luz infrarroja deseada: ¡otra vez resultado positivo! La luz era muy tenue para corrientes de hasta uno o dos miliampères y a partir de ese valor aumentaba de forma espectacular, lo cual era un síntoma muy alentador. Observamos también que se producían figuras de interferencia, una propiedad característica de la luz de láser.

Todo lo que veíamos debía ser pura ilusión; no podíamos creer que aquellos artilugios se comportaran exactamente como láseres. Comprobamos un segundo, y luego un tercer dispositivo, y a continuación todos los demás de la pastilla con resultados sensiblemente iguales. Tanta facilidad parecía irreal, y sin embargo había sucedido así.

Tal era nuestro júbilo que en las semanas siguientes nos resultaba difícil realizar cualquier trabajo serio. Descubrimos que con la ayuda de un dispositivo traductor (denominado “translator”) podíamos hacer pasar los microláseres bajo la sonda eléctrica a razón de una docena por segundo, y girando un simple mando, los láseres emitían o no un destello luminoso, como si de una fila de bombillas se tratara. Una y otra vez hicimos pasar los mismos dispositivos, sin que dieran señales de desgaste. Cada vez que decidíamos realizar mediciones cuantitativas, no tardábamos en vernos girando el mando del traductor y contemplando las luces parpadeantes, sin dar todavía crédito a nuestros ojos.



3. LAS PROGRESIVAS AMPLIACIONES de un microláser revelan el número de capas semiconductoras que lo componen. A la derecha son ya visibles los átomos individuales: arsénico (*gris*), aluminio (*amarillo*) y galio (*rojo*). Las capas se pueden observar en las otras tres figuras: arseniuro de aluminio (*amarillo*), arseniuro de galio (*rojo*), y las mezclas de aleación de arseniuro de galio y aluminio (*naranja*) y arseniuro de galio e indio

láseres individuales, miles o millones mediante técnicas de grabado profundo en dirección vertical, combinadas con las técnicas fotolitográficas habituales.

La idea de epitaxia de haz molecular no encierra mayor dificultad. Primero se coloca un cristal del semiconductor en un recinto al vacío. Se llenan luego unos contenedores con los respectivos elementos químicos, tales como indio, galio, aluminio y arsénico, que se utilizarán para formar las capas de semiconductor deseadas sobre el sustrato base. Cuando se calienta uno de estos contenedores a la temperatura adecuada, el elemento encerrado empieza a evaporarse, y se dirige a través del extremo abierto del contenedor hasta el recinto vacío, a semejanza del vapor que escapa por la boca de una tetera caliente. El resultado es un amplio haz de moléculas que se difunde en la dirección de la oblea base. Cada uno de estos haces moleculares puede bloquearse mediante un obturador mecánico, cuando así se requiera.

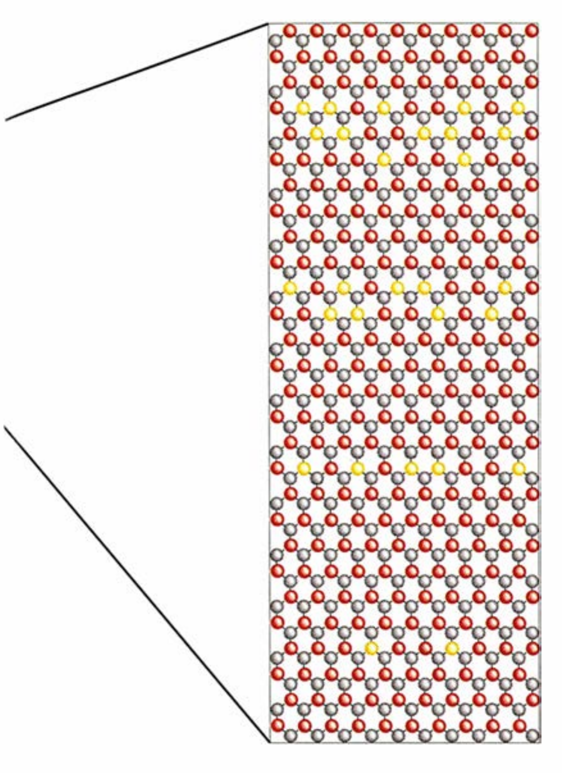
Seguidamente se logra la formación de capas múltiples de diferentes materiales semiconductores por la simple determinación de los elementos químicos que deben estar presentes en cada una de las capas y la apertura de los obturadores oportunos. Por ejemplo, las capas de arseniuro de aluminio se forman abriendo simultáneamente los obturadores del arsénico y del aluminio y manteniendo cerrados todos los demás; análogamente, las capas de arseniuro de galio se forman abriendo los contenedores de arsénico y de galio. El espesor de una capa vendrá determinado por el tiempo en que permanezcan abiertos los correspondientes obturadores. Es tal el refinamiento de la epitaxia de haz molecular que es posible hacer crecer una capa individual de un solo átomo de espesor.

Un microláser típico puede comprender más de 500 capas individuales. Con el fin de reducir al mínimo la energía requerida por el láser, el medio amplificador ha de ser muy delgado, de una centésima de micrometro de espesor. El hecho de que sea tan fino se traduce en que se necesiten muchas más reflexiones de la luz en uno y otro sentido para que el láser funcione como un láser de diodo convencional. En consecuencia, los espejos del microláser deben poseer una reflectividad muy superior a la reflectividad del 30% que caracteriza al láser diódico; de hecho, necesitan un 99% o todavía más.

Se consiguen reflectividades tan elevadas depositando en capas alternadas dos semiconductores diferentes, tales como el arseniuro de galio y el arseniuro de aluminio, que poseen índices de refracción diferentes, es decir, la luz se propaga en su seno con diferentes velocidades. La desigualdad entre los respectivos índices de refracción produce una reflexión parcial en cada interfaz, del mismo modo que la desigualdad entre los índices de refracción del vidrio y del aire origina una reflexión parcial en una ventana. Aunque la reflexión en cada interfaz sea tan sólo del orden del 0,6 por ciento, se puede conseguir una reflectividad superior al 99 por ciento apilando un gran número de capas alternadas de espesores adecuados.

Por consiguiente, y por raro que parezca, lo que abulta realmente de un microláser no es la sección que contiene el medio amplificador, de espesor cercano a la centésima de micrometro, sino los espejos, que totalizan un espesor de cuatro o cinco micrometros. Sin embargo, este relativo grosor de los espejos queda plenamente justificado, dado que es posible hacer crecer de una sola vez todo un conjunto de microláseres (comprendidos los espejos), en lugar de acometer la penosa serie de etapas que conlleva la fabricación de un láser de diodo.

Tan importante como la capacidad de la epitaxia de haz molecular para fabricar un microláser completo en una sola etapa es la precisión con la que establece el espesor de cada una de las capas que lo constituyen. El



(*rosa*). El medio de amplificación real es delgado (*capa rosa*); la mayor parte del dispositivo lo ocupan sus espejos (*capas roja y amarilla*).

control cuidadoso de este espesor tiene particular interés en la fabricación de los espejos, y se logra mediante una técnica basada en el hecho de que una capa atómica individual va adquiriendo rugosidad a medida que crece, hasta que se ha depositado aproximadamente la mitad de su espesor total. A partir de ese momento, la capa se torna cada vez más lisa, hasta que, al concluir el proceso, se queda enteramente lisa a escala atómica.

Se puede determinar el grado de tersura de una superficie bombardeándola con un haz de electrones de alta energía: cuanto mayor sea dicha tersura, más fácilmente reflejará los electrones y los detectará sobre una pantalla situada enfrente. Por lo tanto, la intensidad del haz reflejado oscila con el tiempo a medida que crecen las capas sucesivas. La medida exacta de la frecuencia de esta oscilación permite determinar con gran precisión el tiempo invertido en el depósito de una capa individual de átomos, y por lo tanto la velocidad de deposición, dato que puede ser utilizado para controlar rigurosamente el espesor de las capas. Programando con ordenador el accionamiento de los obturadores antes mencionados, se logra una precisa regulación de todo el proceso.

Otra ventaja de la epitaxia de haz molecular consiste en la posibilidad de modular la conductividad eléctrica y la reflectividad de los espejos. La corriente eléctrica necesaria para la operación de bombeo del diodo debe pasar a través de los espejos, pero desgraciadamente la corriente no circula con facilidad en estas condiciones. Las propiedades eléctricas y ópticas de los materiales no se pueden optimizar simultáneamente, por lo cual el diseño de los microláseres ha de armonizar lo mejor posible estos dos requisitos contrapuestos.

Una vez crecidas las obleas base, se utilizan técnicas convencionales de transferencia de plantillas con el fin de implantar en dichas obleas los microláseres individuales. Primero se deposita una máscara, consistente en una red bidimensional de discos de material resistente al ataque químico, sobre la superficie de la oblea mediante procesos de deposición de vapor y fotolitografía, técnica de impresión que utiliza placas obtenidas a partir de una imagen fotográfica. A continuación, en una nueva etapa del proceso de grabación, un haz colimado de átomos de xenón, guiado por la citada máscara, produce en sentido vertical los microláseres semejantes a latas o botes de bebida. Las paredes laterales resultantes son lisas y el daño producido a las superficies es mínimo.

Nuestro grupo de Bellcore ha utilizado estas técnicas avanzadas para fabricar conjuntos o redes de microláseres en los que se alteraron deliberadamente los espesores de unas pocas capas de uno de los espejos respectivos, de tal modo que la longitud de onda de cada uno de los láseres difiere ligeramente de la de su vecino en incrementos regularmente distribuidos. Estas redes de microláseres podrían tener gran repercusión en el campo de las comunicaciones por fibra óptica, en el que se requiere enviar múltiples señales, cada una de ellas con longitud de onda diferente, por una fibra óptica única.

El grupo de Bellcore ha fabricado también redes completas de microláseres que pueden ser activados y desactivados mediante impulsos luminosos. Tales redes se podrían incorporar en máquinas de procesamiento de la información que trabajaran con procesamiento en paralelo, según el cual distintos elementos de un problema determinado se resuelven simultáneamente y no uno tras otro. Los esfuerzos realizados en tal sentido por la Nippon Electric Corporation, la Universidad de California en Santa Bárbara y los Laboratorios Nacionales Sandia, entre otros, se han visto también coronados por el éxito.

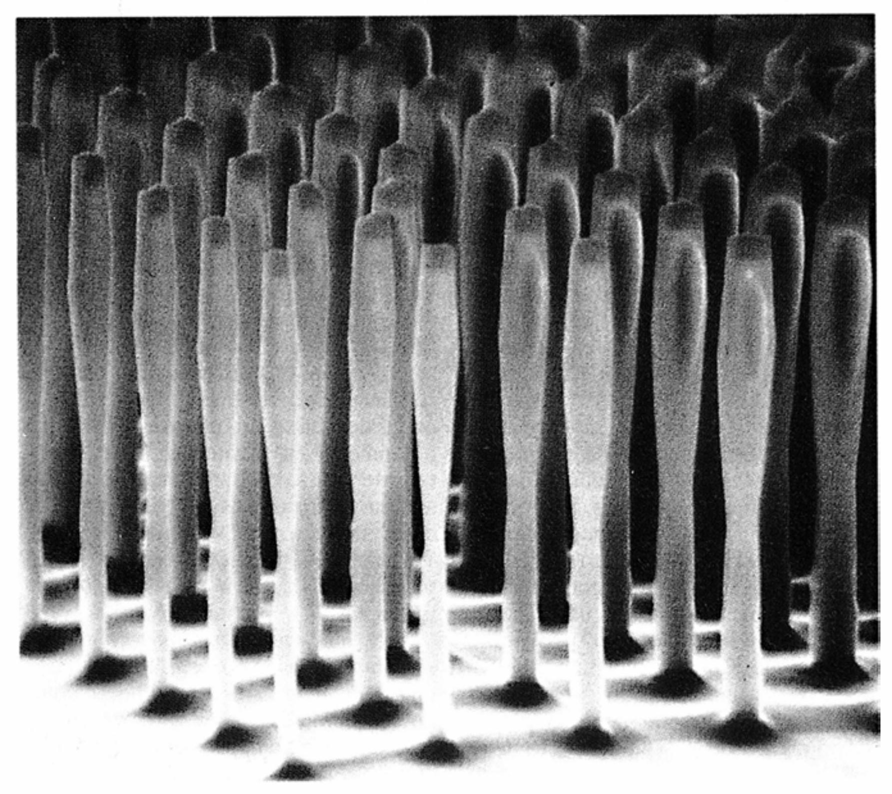
La investigación futura sobre microláseres probablemente va a seguir dos caminos. El primero sería aumentar la longitud de onda emitida por los microláseres, ya que los de la generación actual emiten luz en longitud de onda de un micrometro aproximadamente (radiación infrarroja) y sería deseable llevar ese valor hasta 1,3 o 1,5 micrometros, dado que en estas longitudes de onda las pérdidas de transmisión a través de las fibras ópticas son mínimas y, por lo tanto, presentan un gran interés en el campo de las comunicaciones ópticas. Hasta esta fecha, no se ha conseguido que trabajen muy bien los microláseres que operan en las longitudes de onda más largas, sobre todo por la falta de materiales semiconductores adecuados, susceptibles de crecer en capas apiladas para formar espejos adecuados para trabajar a dichas longitudes de onda. Actualmente, un microláser que funcionara eficientemente en longitud de onda de 1,5 micrometros debería tener una altura de casi 20 micrometros en lugar de los cinco o seis normales, y su crecimiento preciso utilizando la epitaxia de haz molecular ocuparía casi 24 horas. Una estructura de este tipo presentaría dificultades de tipo práctico, si bien cabe la posibilidad de que otros diseños, todavía por comprobar, resulten adecuados.

La segunda línea de investigación, también explorada en este momento, se centra en incrementar la miniaturización, camino que será difícil por cuanto estamos ya próximos al límite de tamaño por debajo del cual los láseres no pueden trabajar. La razón de ello estriba en que el diámetro de un láser debe ser comparable con la longitud de onda de la radiación que emite; si fuera menor que dicha longitud de onda, no podría contener eficazmente la radiación. En este sentido, se ha de reconocer una ventaja adicional en la utilización del arseniuro de galio: aunque la longitud de onda del láser en el aire sea de un micrometro en el interior dicha longitud de onda es aproximadamente la tercera parte, debido al elevado índice de refracción de este semiconductor. Sin embargo, un microláser no podría ya funcionar con un tamaño algo inferior a los 0,3 micrometros.

¿Por qué nos esforzamos en reducir el tamaño de los microláseres desde un valor relativamente cómodo como un micrometro hasta otro valor tan problemático como un tercio de micrometro? Primeramente, esa reducción permitiría aumentar en un orden de magnitud la cantidad de información que puede transmitirse y procesarse



4. ESTRUCTURA EN MULTICAPA de un microláser, puesta de manifiesto en esta fotografía obtenida con microscopio electrónico. Para revelar tal estructura, se han atacado con carácter preferente las capas de arseniuro de aluminio, de suerte que las capas de arseniuro de galio quedan con un diámetro mayor y por ello se proyectan hacia afuera. Esta técnica no se aplica en un microláser operativo.



5. LOS MICROLASERES MAS PEQUEÑOS DEL MUNDO tienen una longitud del orden de ocho micrometros y un diámetro del orden de un micrometro. Los autores han comprobado que funcionan con ráfagas de impulsos luminosos.

para un mismo consumo de energía. En segundo lugar, se podrían conseguir ventajas aún más esenciales en potencia y velocidad, imposibles de predecir por meras consideraciones de tamaño.

Virtualmente, los láseres son dispositivos de muy poco rendimiento. El primer destello luminoso emitido por los átomos bombeados en el medio de amplificación vaga sin rumbo en todas direcciones. La mayor parte de la luz ni siquiera incide en los espejos del láser, y por consiguiente se pierde. Tan sólo una minúscula fracción de la luz total, del orden de una parte en 10.000, se mueve en la dirección adecuada para contribuir al funcionamiento del láser. Resulta, no obstante, que, cuando la cavidad que contiene el medio de amplificación es corta y su diámetro es pequeño, las paredes de la propia cavidad pueden modificar, por medio de reflexiones, la dirección en que se emite inicialmente la luz. En una cavidad pequeña, la luz sólo se puede emitir según ciertas direcciones permitidas y en longitudes de onda determinadas. Si el tamaño de dicha cavidad es extremadamente pequeño, la luz se emite solamente en la dirección del haz de láser deseado.

De todo ello se desprende que los microláseres de diámetro aproximadamente igual a un tercio de micrometro son tal vez la meta final de los dispositivos optoelectrónicos procesadores de información: láseres pequeños, rápidos y muy eficientes, con un consumo de energía muy bajo. Aunque la motivación principal para fabricar un dispositivo así sería el procesamiento de información, se abrirán a otras aplicaciones; por ejemplo, un sistema de alumbrado de alto rendimiento basado en paneles de microláseres de luz visible que daría un giro radical a las aplicaciones de los láseres desde la novísima tecnología de los ordenadores optoelectrónicos hasta las lámparas de uso casero y cotidiano.

Los autores de este artículo hemos experimentado para determinar el mínimo tamaño que puede darse a un microláser compatible con su funcionamiento normal. Y, así, bombeamos los átomos en el medio de amplificación mediante ráfagas focalizadas de luz en lugar de utilizar una corriente eléctrica. Son mucho más fáciles de fabricar los dispositivos bombeados con luz que los bombeados por procesos eléctricos, y aunque no se espera que los primeros lleguen a tener nunca un valor en el mercado, las pruebas que con ellos hemos efectuado han contribuido a convencernos (y convencer a

nuestros directivos) de que la pretensión de fabricar cavidades de este tamaño con bombeo eléctrico no es enteramente descabellada.

Hasta ahora hemos demostrado que pueden funcionar dispositivos cuyo diámetro sea de sólo medio micrometro. Resulta interesante señalar que nuestras pruebas se han adelantado a cualquier simulación teórica precisa realizada al respecto. El modelar las complejas interacciones que se producen en un elevado número de capas de semiconductores consumirían cantidades enormes de tiempo en cualquier ordenador e incluso podrían exigir el uso de un ordenador óptico.

Quizás el aspecto más excitante de la investigación sobre los microláseres sea el modo en que estos dispositivos abarcan toda una gama de disciplinas: física fundamental, física instrumental, óptica clásica, óptica de semiconductores, optoelectrónica e integración de sistemas. Los microláseres desafían también la creatividad de los investigadores, invitándoles a explotar las numerosísimas aplicaciones aún no descubiertas. Las comunicaciones y los sensores remotos son dos de los campos en los que los sistemas ópticos parecen presentar ventajas decisivas respecto a los electrónicos. Dado que la visión artificial va adquiriendo importancia, podrían utilizarse unas redes de microláseres de coste no excesivo como elemento esencial de una tecnología adaptada para ayuda de los invidentes. Nuestra creencia de que las aplicaciones posibles de los microláseres cubrirán una gama amplísima no tiene todavía confirmación práctica, por lo que nos cabe esperar que sea la propia dinámica del progreso al cabo de los años la que señale los aciertos y los errores de estas predicciones.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HETEROSTRUCTURE LASERS. H. C. Casey, Jr., y M. B. Panish. Academic Press, 1978.

PHYSICS OF SEMICONDUCTOR DEVICES. Simon M. Sze. John Wiley & Sons, 1981.

THE TECHNOLOGY AND PHYSICS OF MOLECULAR BEAM EPITAXY. Dirigido por E.H.C. Parker. Plenum Publishing, 1985.

TENDENCIAS EN MATERIALES. Elizabeth Corcoran en *Investigación y Ciencia*, n.º 172, enero de 1991, págs. 76-86.

VERTICAL-CAVITY SURFACE-EMITING LASERS: DESIGN, GROWTH, FABRICATION, CHARACTERIZATION. J. L. Jewell, J. P. Harbison, A. Scherer, Y. H. Lee y L. T. Florez en *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 27, n.º 6, págs. 1332-1346; junio de 1991.

El tratamiento de enfermedades mediante cultivos celulares

El éxito alcanzado en el cultivo de células de piel ha posibilitado la restauración de la epidermis tras graves quemaduras y otras formas de agresión

Howard Green

Los biólogos que investigan en problemas básicos se sienten cumplidos cuando sus investigaciones abocan a una aplicación práctica. En 1974 no me guiaba ningún interés terapéutico, cuando ciertos experimentos realizados en mi laboratorio sobre cultivo de tumores de ratón sugirieron la posibilidad de un nuevo camino en el tratamiento de las heridas humanas producidas por quemaduras. Esa línea de trabajo condujo a la creación de un nuevo método para el crecimiento en cultivo de células epidérmicas humanas y, en 1979, a su empleo para regenerar epidermis en quemados de tercer grado. Con el tiempo, la aplicación de esos cultivos se generalizó al tratamiento de otras enfermedades.

Aunque pueda parecer improbable que el estudio de un tumor de ratón desembocara en el tratamiento de quemaduras en el hombre, ambas cuestiones se hallan relacionadas, si bien la ligazón no es obvia. Mi alumno de doctorado James G. Rheinwald y yo investigábamos los teratomas del ratón, tumores que poseen células pluripotenciales, capaces de originar células somáticas de múltiples tipos. Tras sucesivos experimentos, conseguimos las condiciones que permitían la proliferación de colonias de un tipo celular insólito. Examinadas, resultaba evidente que las colonias eran de células epiteliales escamosas o queratinocitos, amplia categoría que abarca células de la epidermis, la capa más externa de la piel, y células que tapizan la cavidad oral, la faringe, el esófago, la córnea y la vagina.

Se trataba de un descubrimiento interesante. No se conocían entonces las condiciones que permitieran una multiplicación sustancial de los queratinocitos humanos en cultivo. ¿Podrían aplicarse con igual éxito las condiciones de cultivo de los queratinocitos de teratoma de ratón a los queratinocitos de la epidermis humana? Cuando sometimos a ensayo estos últimos en idénticas condiciones de cultivo, disfrutamos observando su rápido desarrollo y su capacidad de subcultivo reiterado; podían fabricarse, pues, en grandes cantidades.

HOWARD GREEN regenta la cátedra George Higginson en el departamento de fisiología celular y molecular de la Universidad de Harvard. Ha consagrado la mayor parte de su vida científica a la diferenciación celular, la genética y el desarrollo, ensayando con células cultivadas de mamíferos.

El cultivo de tejidos no constituye ninguna novedad. Si bien empezó hace más de un siglo, no tuvo aplicación práctica hasta los años cuarenta, cuando el uso de la técnica de disociación de células permitió mayor proliferación que la conseguida con el cultivo de fragmentos de tejido. Pero ni siquiera hoy podemos multiplicar, de una forma generalizada en idóneas condiciones de cultivo, la mayoría de los aproximadamente 200 tipos celulares distintos que se encuentran en el cuerpo humano.

El número restringido de tipos celulares procedentes de tejidos normales que admiten cultivo derivan del tejido conectivo. Podemos citar, entre aquéllos, los fibroblastos, precursores mioblásticos de células musculares, las células endoteliales que tapizan el corazón, los vasos sanguíneos y linfáticos, y las células mesoteliales que recubren las cavidades peritoneal y pleural, las dos grandes cavidades del cuerpo. Además de los queratinocitos, pueden cultivarse con éxito otros tipos de células epiteliales, como las células uroteliales y las células epiteliales mamarias.

Las células humanas son estables en cultivo y no pierden su capacidad de diferenciación. Cabía, pues, que nuestros cultivos sirvieran de injertos para la regeneración de la epidermis. La epidermis es un tejido particularmente apropiado para la regeneración a partir de cultivos, ya que más del 90% de la misma consta de un solo tipo celular, los queratinocitos. Estas células reciben el nombre de sus proteínas más abundantes, las queratinas, que forman filamentos. En la epidermis residen también otros tipos celulares, pero no se ocupan de su estructura; por ejemplo, los melanocitos o células formadoras de pigmento, los linfocitos *T* pertenecientes al sistema inmune y las células de Langerhans, una suerte de macrófagos, amén de las células de Merkel, neuroendocrinas.

La epidermis está constituida por dos partes, cada una de las cuales forma varias capas. La parte interna contiene las células vivas; la externa, esqueletos celulares o corneocitos. Carentes de metabolismo, las células córneas aportan, sin embargo, la mayor parte de la resistencia que la piel opone a los ataques físicos y químicos. En su estado, normalmente deshidratado, son también responsables de la impermeabilidad de la piel al agua. En la parte viva de la epidermis, los queratinocitos se preparan para llegar a ser corneocitos, haciéndose cada vez más especializados a través de un proceso de diferenciación terminal, seguido de una muerte celular programada. A decir verdad, los queratinocitos son células que muertas realizan su función mejor que vivas.

En la capa basal de la parte viva de la epidermis, las células se originan por multiplicación. En el intervalo que media entre su nacimiento y su transformación en corneocitos, el queratinocito crece y remodela su citoplasma;

por eso, cuando está a punto de convertirse en corneocito presenta una estructura distinta de la que ofrecía en su juventud.

Los queratinocitos proliferantes son células pequeñas, que se apoyan sobre la membrana basal que separa la epidermis del tejido conectivo subyacente. Las células de esta capa basal se dividen muy despacio, a una velocidad en la que la progenie sólo logra reemplazar las células que alcanzan la diferenciación terminal. Se necesitan tres o cuatro semanas para que una célula, generada por una división en la capa basal, atraviese las capas vivas y cornificadas y sea descamada, constituida en corneocito, en la superficie externa.

Por debajo de la epidermis hay un tejido conectivo especializado, la dermis. Sus células principales, los fibroblastos, fabrican el colágeno y la elastina que sirven de elementos estructurales extracelulares. La dermis contiene también folículos pilosos, glándulas sebáceas y sudoríparas, así como capilares sanguíneos dispuestos ordenadamente. El fluido que nutre la epidermis procede de los capilares sanguíneos, aunque se va cargando con productos de los fibroblastos a medida que fluyen o difunden a través de la dermis antes de cruzar la membrana basal y alcanzar la epidermis.

Los productos procedentes de los fibroblastos resultan imprescindibles para la óptima proliferación de los queratinocitos. Incluíamos fibroblastos en nuestros cultivos para que suministraran sus productos a los queratinocitos. Empleábamos a tal efecto una línea estable de fibroblastos, la 3T3, desarrollada en mi laboratorio unos años antes. Después de irradiar letalmente las células 3T3 para detener su propio crecimiento, las introdujimos en número suficiente para cubrir el fondo del frasco de cultivo antes de añadir las células epidérmicas. Aunque está claro que los productos de las células 3T3 son esenciales para la proliferación de los queratinocitos, seguimos sin saber la naturaleza de aquéllos.

Sí descubrimos que ciertas sustancias, conocidas de antemano, facilitaban la proliferación de los queratinocitos. De ahí que incluyéramos más tarde, en el medio de cultivo, factor de crecimiento epidérmico, toxina colérica —que estimula el crecimiento de las células, mientras no las dañe— y una mezcla de factores de crecimiento hallados por otros investigadores.

Una vez fijadas las condiciones experimentales, mi colega Yann Barrandon y yo estudiamos con todo detalle la proliferación de los queratinocitos cultivados. Cuando las células epidérmicas se disocian unas de otras con la enzima tripsina, que rompe las uniones



1. PROLIFERACION de células epidérmicas humanas en cultivo. Estos frascos contienen colonias de queratinocitos teñidos, cultivados durante siete, nueve, 11 y 14 días (*de izquierda a derecha*). En la práctica habitual, el número inicial de células es mayor, terminando su crecimiento a los siete a nueve días. El epitelio resultante por convergencia (que ocupa toda la superficie del frasco), se despega y está listo para usarlo en un injerto.

entre las células, y se colocan en los frascos de cultivo, la mayoría se muestra incapaz de formar colonias debido a que ya han iniciado el proceso de diferenciación terminal. Aun cuando las condiciones de cultivo sean las idóneas, sólo del 1 al 10% de las células de una epidermis proliferarán y formarán colonias. Cuando las colonias son pequeñas, las células se multiplican exponencialmente, con un tiempo de duplicación en torno a las 17 horas.

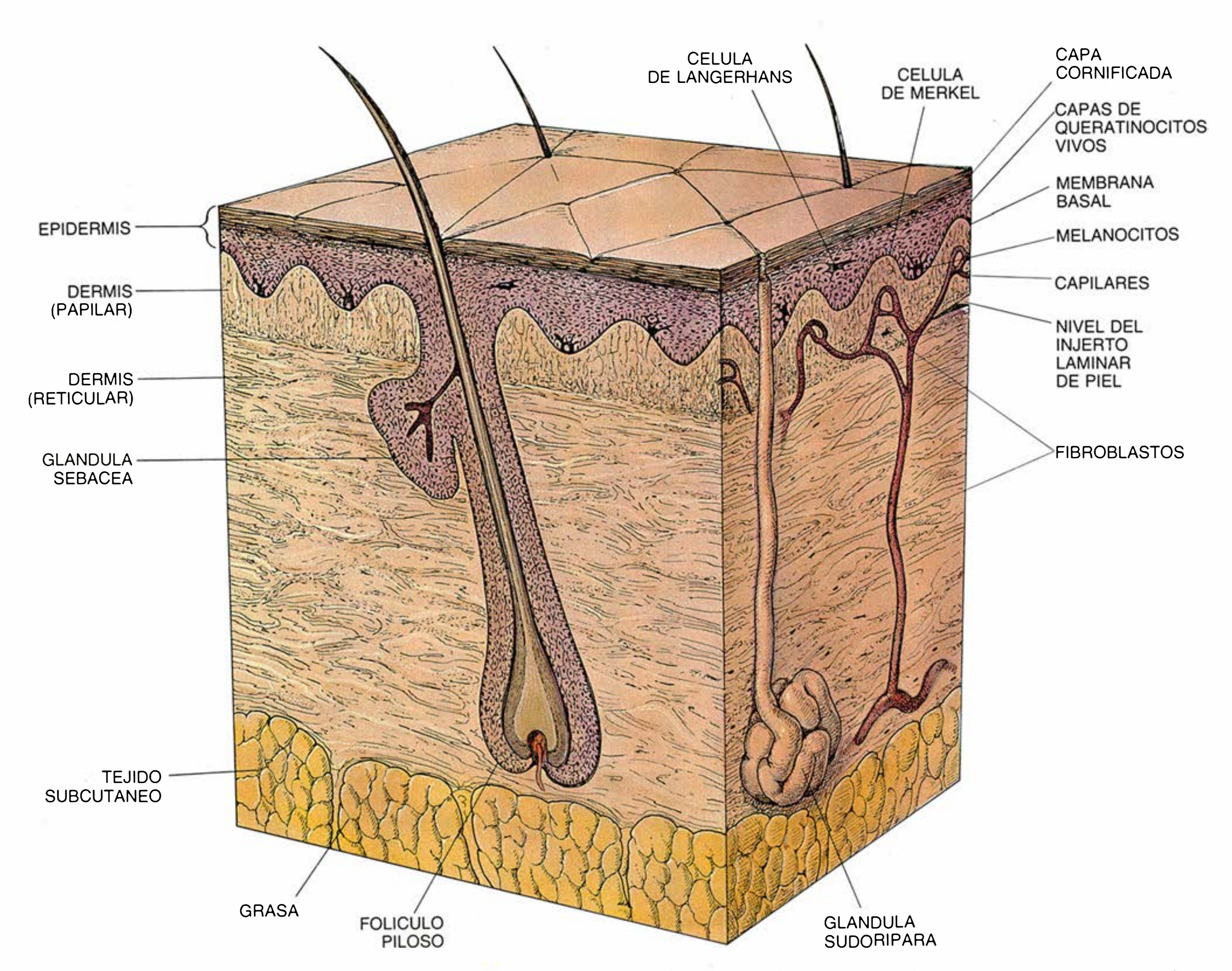
Si en este momento volvemos a separar las células y las transferimos a un medio fresco, formarán colonias, con un rendimiento ahora del 70%. En humanos, tal explosión proliferativa se daría en la epidermis sólo en condiciones de cicatrización de heridas y por períodos muy cortos. Podemos, pues, concluir seguros que nuestras condiciones de cultivo proporcionan condiciones de proliferación epidérmica mejores que las de la propia epidermis.

Las poblaciones de queratinocitos en crecimiento ni siquiera son homogéneas y es posible aislar subtipos clonales que difieren mucho en su potencial de crecimiento. Bajo condiciones de cultivo deficientes, los holoclones, clones con un alto potencial de crecimiento, se degradan en paraclones, clones con un limitado potencial de crecimiento. Por ello es vital crear las condiciones de cultivo que preserven los holoclones.

En menos de una semana de crecimiento, una colonia epidérmica ha formado una monocapa de unas 600 células. En estos momentos, las células de la región central empiezan a estratificarse e inician la diferenciación terminal. Así, se van añadiendo nuevas capas de células entre las basales y el medio de cultivo. Pero la incapacidad de las capas superiores para proliferar significa que la colonia entera ya no puede crecer exponencialmente y, en consecuencia, cae la tasa media de crecimiento. Para aumentar el número de células con la mayor celeridad posible, es preciso disociar las células antes de que las colonias comiencen a estratificarse, transferirlas a otros frascos y dejar que empiece de nuevo la formación de colonias.

En virtud de la separación de las células proliferantes de las que han madurado hasta la diferenciación terminal, cada colonia importante adquiere una polaridad parecida a la de epidermis normal. Las células basales tapizan la superficie del frasco de cultivo, como si estuvieran sobre la membrana basal de la epidermis; las células en diferenciación terminal son suprabasales, igual que en la epidermis. No obstante, la epidermis se nutre desde el lado basal, cercano a los vasos sanguíneos de la dermis, mientras que las células en cultivo se nutren desde el lado diferenciado, en contacto con el medio suprayacente.

En la epidermis, los queratinocitos de las distintas capas están unidos por desmosomas, junturas de cohesión entre células adyacentes. En cultivo, se forman desmosomas entre las células de cada colonia en crecimiento. A medida que aumenta el radio de las colonias, a razón de dos milímetros dia-



2. PARTES COMPONENTES DE LA PIEL: epidermis y dermis. Los queratinocitos muertos o corneocitos forman la capa externa de la epidermis; los vivos, la parte interna. La dermis subyacente se compone de los fibroblastos, la capa papilar y la capa reticular.

rios, las células de colonias vecinas empiezan a establecer contactos, formándose desmosomas en esos puntos. En su expansión, las colonias barren de la superficie de los frascos las células 3T3. Cuando las colonias convergen, constituyen láminas uniformes de epitelio genuino, cuyas células están trabadas entre sí por desmosomas.

El epitelio cultivado se adhiere vigorosamente a la superficie de los frascos, pero con la dispasa podemos despegarlo suave y fácilmente, como una lámina estratificada; esa enzima proteolítica disuelve las uniones entre las células basales y la superficie del frasco, sin afectar a las uniones desmosómicas establecidas entre células adyacentes.

Así constituido, el epitelio cultivado es sólo un facsímil de la epidermis. El nuevo tejido se presenta en estratos y tiene polaridad, pero su organización celular es irregular, por la presumible razón de que las células han crecido con excesiva rapidez, sin tiempo para alinearse correctamente. Además, el proceso normal de diferenciación terminal no se ha desarrollado con la debida precisión (hay pocas células cornificadas en la superficie externa y contadas células granulares, que recubren el límite externo de la parte viva de la epidermis). Las células cultivadas no consiguen sintetizar queratinas que, en condiciones normales, aparecen durante la diferenciación de las capas celulares más externas de la parte viva de la epidermis. Tendrían que operarse muchos cambios, sin duda, para que naciera, del epitelio de cultivo, una epidermis bien diferenciada y debidamente organizada.

Nos quedaba transplantar los cultivos, para determinar si podían o no ocurrir los cambios estructurales y bioquímicos necesarios. En nuestros primeros experimentos, transplantamos cultivos humanos a ratones atímicos, incapaces de rechazarlos. El resultado fue una epidermis humana histológicamente normal.

Este éxito nos dio la confianza suficiente para indagar sobre la utilidad terapéutica en humanos de los injertos cultivados. En 1979 y 1980, Nicholas E. O'Connor y John Mulliken, aplicaron los injertos de cultivo a adultos gravemente quemados en el Hospital bostoniano Peter Bent Brigham, hoy Brigham and Women's. Trajeron a mi laboratorio biopsias de piel que se les practicaron; allí disociamos las células con tripsina y se cultivaron en cajas de petri hasta ocupar toda la superficie de las mismas. Arrancamos luego el epitelio con dispasa, eliminamos por lavado las proteínas extrañas, lo pegamos a un soporte de gasa, se llevó al hospital y se aplicó a los pacientes. Aproximadamente la mitad de los cultivos prendieron y generaron epidermis.

G. Gregory Gallico III y O'Connor aumentaron la escala de este trabajo con niños de la sala dirigida por John P. Remensnyder en el Instituto bostoniano Shriners Burns. Algunos tenían quemada más del 90% de la superficie corporal. En una espectacular serie de pruebas, más de la mitad de la epidermis de esos niños se regeneró gracias a los cultivos. Desde entonces se ha intervenido con injertos de cultivo en centros sanitarios de Leiden, Génova, Estocolmo, México y muchos más de Canadá, Estados Unidos y Europa.

Hasta aquí, me he limitado a describir la generación de epitelio en quemaduras de tercer grado, en que no sólo se destruye la epidermis, sino también los folículos pilosos y las glándulas sudoríparas, dotados de queratinocitos capaces de regenerar la epidermis. De no ser minúsculas, estas heridas no sanan espontáneamente. Hay que introducirles queratinocitos nuevos para que aporten descendencia durante toda la vida del paciente. Por eso no sirven las células epidérmicas de otras personas. Aunque funcionen transitoriamente, no tardarán en ser rechazadas por el sistema inmune del paciente. Los queratinocitos cultivados que se usan para generar epidermis destinada a quemaduras de tercer grado deben proceder, pues, del propio paciente.

La cantidad de epidermis no quemada que se necesita para preparar los cultivos es pequeña. Con biopsias de tres centímetros cuadrados, el área de epitelio puede multiplicarse más de 5000 veces en tres o cuatro semanas, produciendo suficiente epitelio para cubrir, aproximadamente, la superficie del cuerpo de un adulto, o sea, 1,70 metros cuadrados.

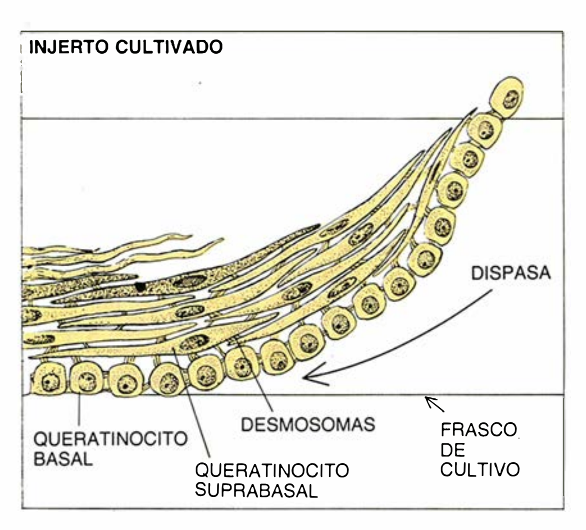
En el trabajo a estas escalas intervienen muchas personas del laboratorio, capacitadas para manipular un gran número de cultivos a la vez. Piénsese que, para restaurar una epidermis lo más rápidamente posible, habría que cubrir la superficie ventral o dorsal del cuerpo en una sola operación. Para un adulto medio, esto requeriría más de 350 injertos de 25 centímetros cuadrados. La infraestructura logística para acometer semejante proceso ha sido desarrollada por Olaniyi Kehinde, primero en mi laboratorio y más tarde en BioSurface Tecnology, Inc. en Cambridge, Massachusetts.

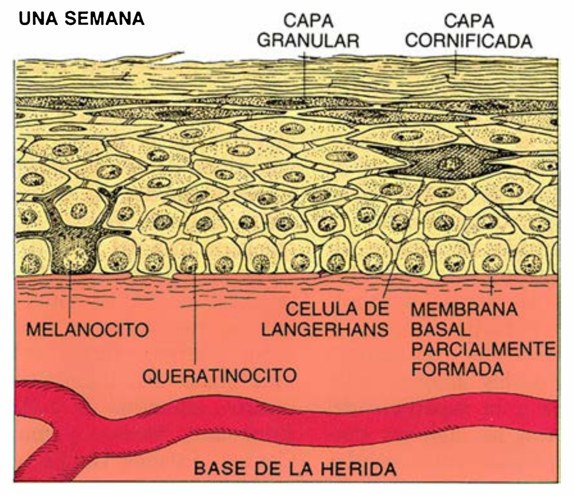
Mucho antes de disponer de epitelios cultivados, el injerto de piel era una técnica aceptada. Desde la creación del método, hace un siglo en Francia, se han practicado injertos laminares, transferidos directamente de una parte del cuerpo a otra. Estos injertos tienen un grosor aproximado de unos 0,3 milímetros y portan la epidermis entera del lugar donde se toma, junto con una capa de dermis aún más gruesa. La epidermis del lugar donante se restaura gracias a los queratinocitos de los folículos pilosos y glándulas sudoríparas, cuyas partes más profundas se han dejado intactas. Estos queratinocitos subirán a la superficie de la herida y proliferarán hasta recubrirla con nueva epidermis.

Cuando un injerto laminar se transfiere a otro lugar, debe adherirse a la base de la herida. Se trata de una unión entre dos tejidos conectivos: la dermis del injerto y la dermis o el tejido más profundo de la base de la herida. Esa adhesión primaria viene posibilitada por macromoléculas presentes en el plasma o fluido hístico, si bien carece de consistencia hasta que la sellan los fibroblastos y se refuerza con sus principales productos, los colágenos. Estas proteínas se depositan en forma de fibras gruesas que se perciben frecuentemente como cicatrices.

En esta unión, la epidermis es pasiva. No ha sufrido apenas alteración, ya que permanece unida a su membrana basal y a la dermis subyacente que se arrancó del lugar donante. Parece asombroso que la epidermis sobreviva a este proceso. Hasta que la circulación capilar se extienda a la dermis del injerto, el fluido nutritivo que llegue a la epidermis debe recorrer largo trecho desde los capilares de la base de la herida. El paso del fluido podría obstruirse por coágulos sanguíneos, inflamación y, más tarde, por la cicatriz.

La unión que se establece entre un injerto de epitelio de cultivo y la superficie de la herida es completamente distinta. No podemos afirmar que haya en puridad tejido conectivo en el injerto cultivado. Aunque se encuentren algunos fibroblastos entre las células epidérmicas tripsinizadas que se usan para iniciar los cultivos, las células 3T3 irradiadas suspenden la multiplicación de los mismos; quedan muy pocos para cuando los queratinocitos cultivados comienzan a converger. Así, el injerto ofrece a la base de la herida una superficie epitelial esencialmente pura. El contacto directo entre ambas caras debería facilitar la nutrición de las células epiteliales, ya que el transplante no posee ningún tejido conectivo que se interponga entre ellas y los capilares de la base de la herida. Pero la unión y anclaje del epitelio requerirá estructuras diferentes de las exi-







3. INJERTO DE EPITELIO CULTIVADO y regeneración de la piel. En el transcurso de una semana la epidermis contiene las capas granular y cornificada; no pasará mucho tiempo sin que se pueble de melanocitos, células que producen pigmento, y de células de Langerhans del sistema

gidas en los injertos de piel tradicionales.

Los injertos convencionales suelen cortarse en forma de parche para que abarquen mayor extensión de la herida. Esta práctica, sin embargo, deja huecos que deben ocuparse. Las células epidérmicas que han de cubrir estas lagunas tendrán que formar, como en los cultivos, un sistema de anclaje. Pero recorrerán también un largo trecho a través de la base de la herida y deberán desarrollar una proliferación local más intensa que las células cultivadas.

La normalización estructural del tejido epidérmico y conectivo que sigue al injerto de epitelios cultivados ha sido objeto de investigación por el equipo de Carolyn C. Compton, del Instituto Shriners Burns. Usando muestras procedentes de biopsias de piel, regenerada a lo largo de cinco años tras un transplante de cultivos en amplias superficies quemadas, descubrieron que los elementos componentes de la estructura normal se regeneraban con una cadencia distinta. En el intervalo de una semana, reaparecían las capas granular y cornificada de la epidermis y se regularizaba la organización celular. Y no se demoraba mucho la aparición de otros tipos celulares que son habituales en la piel: melanocitos y células de Langerhans.

Los melanocitos cultivados en solitario no crecen con la facilidad de los queratinocitos. A pesar de lo cual, Michele De Luca, del Instituto genovés del Cáncer, ha comprobado que la tasa de crecimiento de los melanocitos mejoraba cuando los cultivaba en presencia de queratinocitos. Por tanto, los injertos cultivados contienen melanocitos. Tras el injerto, los melanocitos se multiplican y migran hasta ocupar su posición habitual, dispersos en la capa basal de la epidermis regenerada.

Las células de Langerhans, que se originan de la médula ósea, no se multiplican en las condiciones de cultivo empleadas, por lo que resulta verosímil que no las haya en los injertos. Ahora bien, estas células, transportadas por la sangre, no tardan en presentarse en la epidermis regenerada a partir de injertos cultivados, ya que tienen la capacidad de invadir la epidermis desde la dermis subyacente, proceso que acometen en situación de normalidad para mantener su número en la epidermis. La epidermis generada a partir de cultivos cuenta, tal parece, con todos los requerimientos necesarios para la migración y proliferación de los melanocitos, así como para la invasión de las células de Langerhans. Entre estos requerimientos merecen destacarse, a buen seguro, los factores quimiotácticos.

Una semana después del transplante de los cultivos, se insinúa la membrana basal en forma de manchas aisladas, que está terminada tres o cuatro semanas más tarde. Las fibrillas de anclaje, que en condiciones normales fijan la membrana basal a la dermis, se observan también durante la primera semana. Con el tiempo se alargan y multiplican; al cabo de uno o dos años se hacen similares en número, tamaño y ramificaciones a las fibrillas de la piel normal. A los doce meses, más o menos, aparecen, en el límite entre epidermis y tejido conectivo, las ondulaciones promovidas por la formación de las papilas o proyecciones dérmico-epidérmicas, lo mismo que en la piel normal.

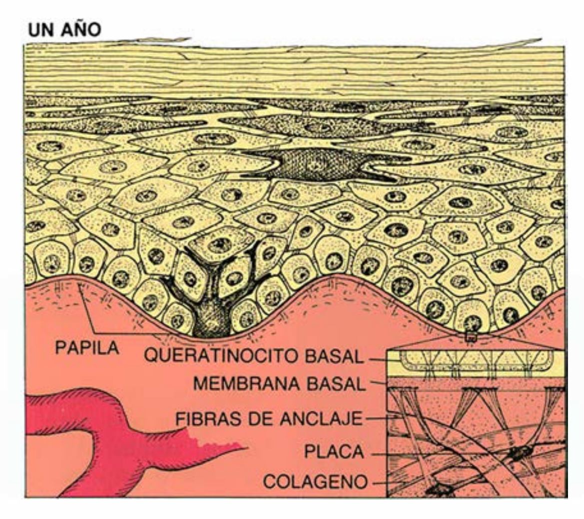
Y, por encima de todo, transcurridos de dos a cinco años desde el transplante, el tejido conectivo subyacente adquiere una estructura muy afín a la que presenta la dermis normal. El tejido conectivo próximo al epitelio se convierte en una dermis papilar finamente fibrosa. Más arriba, la dermis se trueca en una suerte de red de fibras gruesas. En la dermis reticular aparecen fibras elásticas y en la dermis papilar los vasos sanguíneos adoptan el típico patrón arqueado. En resumen, en el período de cinco años estudiado hasta ahora, se regenera no sólo la epidermis, sino también la dermis subyacente.

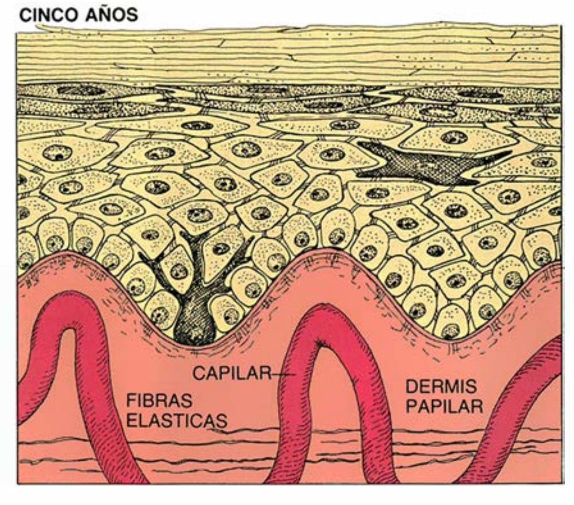
La epidermis se manifiesta como una estructura capaz de autoensamblaje. Cada queratinocito posee toda la información necesaria para organizar la epidermis, puesto que una célula aislada y cultivada crece formando un epitelio que, cuando se transplante, generará una epidermis. Los otros tipos celulares, cuando se instalan en la epidermis, reciben instrucciones de los queratinocitos.

No parece que los queratinocitos reciban instrucciones de fuera. Los de las palmas de las manos y de la planta de los pies, por ejemplo, tienen especificidad para el lugar: su estructura histológica es peculiar y sintetizan queratinas de un tipo que no se fabrica en otras zonas. Cuando estas células crecen en cultivo y se transplantan a otros lugares del cuerpo, conservan su especificidad original. Ello contrasta con el comportamiento de las células epiteliales en sus primeras fases, de las que se sabe que las instruye el tejido conectivo embrionario adyacente para cumplir el tipo de diferenciación correspondiente. Es evidente que las células epidérmicas aprenden bien la lección, puesto que no la olvidan después del nacimiento.

El éxito de los transplantes de cultivo en la intervención de quemados está condicionado a la superación de otra dificultad importante. La superficie receptora del transplante suele estar contaminada con microorganismos,







inmune. La membrana basal queda acabada en tres o cuatro semanas. Al cabo de un año, se han desarrollado por completo las fibras de anclaje que amarran la membrana basal a la dermis; el límite entre la epidermis y el tejido conectivo subyacente aparece ondulado por las papilas.

situación a la que son más sensibles los injertos de cultivo que los injertos ordinarios de piel. Por tanto, los cultivos requieren una preparación más meticulosa de las heridas y la eliminación, casi absoluta, de microorganismos.

Para lograr ese fin se procedía al transplante provisional de piel congelada, procedente de cadáveres. Cuando esos aloinjertos (autoinjertos son los realizados con la propia epidermis) se aplican a la base de la herida, prenden muy bien, por lo común. El tejido vecino, ahora cerrado, se limpia pronto de microorganismos por los mecanismos de defensa del paciente. Los injertos extraños, que no tardarían en ser destruidos por el sistema inmune del paciente, se extraen, reemplazándolos con piel del propio paciente.

En 1986, Charles B. Cuono, Joseph McGuire y sus colaboradores, de la Universidad de Yale, modificaron el método. En vez de quitar el aloinjerto entero, extirpaban sólo la parte epidérmica e injertaban el tejido de cultivo en el lecho restante de alodermis. Con este método se consigue un rendimiento superior al 85% en el injerto de cultivos, y lo han adoptado numerosos centros de quemados. Además de esterilizar mejor la zona receptora, la alodermis residual puede conferir propiedades beneficiosas asociadas a su función diferenciadora normal, a pesar de que se destruyen en seguida todas las células alogénicas y se eliminan la mayoría de los productos extracelulares.

Tras su eficacia comprobada en el tratamiento de quemaduras de tercer grado generalizadas, se han aplicado los cultivos al remedio de otras situaciones en las que es necesario regenerar epidermis. Así, en el caso de los niños con nevo piloso congénito gigante. En este síndrome, los melanocitos anormales, además de producir una imagen antiestética, están sujetos a cambios malignos. Los nevos gigantes se extirpan desde un arranque profundo, cubriéndose las heridas con injertos laminares de piel no afectada. Ocurre a veces que esos nevos pigmentarios abarcan, sin embargo, tal extensión corporal que es difícil encontrar suficiente piel sana para conseguir los injertos necesarios. Pero se requiere muy poca piel para obtener muchos injertos de cultivo, razón por la cual Gallico ha usado este método de regeneración de la epidermis en el Hospital General de Massachusetts. Siendo limpia, además, la disección de las heridas en este caso, los injertos de cultivo prenden muy bien.

Se ha echado mano de esos cultivos regeneradores para eliminar cicatrices, en particular las que, por su extensión, limitan la capacidad de movimiento. Los queloides, que aparecen por acumulación excesiva de tejido cicatricial, han sido tratados por O'Connor mediante extirpación, seguida de injerto de cultivos.

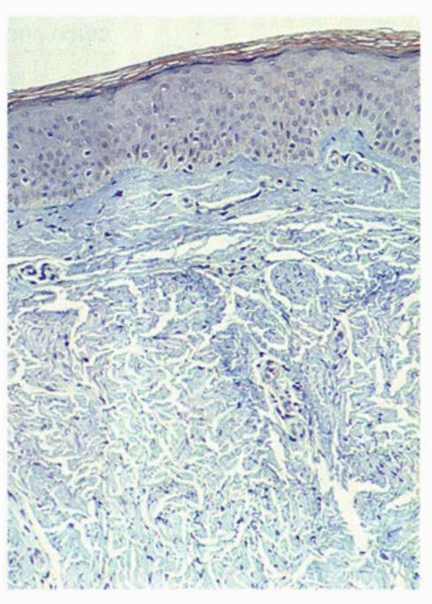
Los cultivos de queratinocitos de la cavidad oral han servido para regenerar epitelio de la boca; los cultivos de queratinocitos procedentes de la uretra, para reparar defectos congénitos del pene. En Inglaterra, los queratinocitos epidérmicos cultivados se han aplicado a la restauración de la capa epitelial que tapiza las cavidades mastoideas crónicamente infectadas, asociadas a patología del oído medio, con la eliminación consiguiente de los dolores crónicos de esta región.

Los injertos de cultivo han remediado, asimismo, úlceras crónicas de la piel. El equipo de Irene Leigh, del London Hospital, ensayaron el empleo de esta técnica en la terapia de úlceras de las piernas, una afección corriente en personas de cierta edad, que va ligada muy a menudo con una circulación deficiente y diabetes. Son úlceras resistentes a la terapia habitual y persisten durante años. En la primera prueba, bastó una sola aplicación de injerto para curar una parte importante de estas úlceras. La idoneidad del método se confirmó en el trabajo llevado a cabo en el Hospital de la Universidad de Boston por Tania Phillips y Barbara Gilchrest. En esa misma línea, la investigación realizada por Robert Teepe, hoy en el Ziekenhuis Leyenburg de La Haya, y sus colegas, de Leiden, demostró que las aplicaciones sucesivas de injertos de cultivo reforzaban la eficacia. Los tres grupos comprobaron que el injerto de cultivo producía un rápido alivio del dolor que suele acompañar a este tipo de lesiones.

Estas investigaciones demostraron que los aloinjertos procedentes de cultivo se mostraban tan eficaces como los autoinjertos, resultados que, en un comienzo, alimentaron la especie de que, en oposición a los heteroinjertos de piel, las células epidérmicas cultivadas pervivirían en un medio receptor extraño. Pero, al emplear marcadores cromosómicos o de ADN para distinguir entre células del donante y del receptor, quedó claro que, al poco de la aplicación de aloinjertos de cultivo, no había ninguna célula del donante en la epidermis que cubría la úlcera en curación.

¿Cómo sanaban, pues, las úlceras? Estudios recientes han mostrado algunas pistas. Hoy sabemos que los queratinocitos pueden sintetizar y segregar una amplia variedad de factores de crecimiento polipeptídicos. Uno de ellos, el TGF (alfa), es un polipéptido que, como factor de crecimiento epidérmico, estimula la proliferación y migración de los queratinocitos. Este





4. PIEL REGENERADA a partir de epitelio cultivado (*izquierda*), a los dos meses y medio después de un aloinjerto dérmico. A diferencia de los injertos en red laminares, los límites entre los injertos son invisibles; sin embargo, la epidermis está más enrojecida y es más frágil de lo normal. Con el tiempo, la piel adquirirá un tono más pálida y se hará más vigorosa. El corte histológico (*derecha*) muestra piel regenerada procedente de cultivo cinco años después del transplante. Se aprecian las mismas características que la piel normal: una epidermis madura, una membrana basal con circunvoluciones y una dermis reticular y papilar bien desarrolladas.

polipéptido puede, por tanto, ser considerado un factor de crecimiento autocrino estimulador del crecimiento de los muchos tipos celulares que lo producen. Dado el gran número de polipéptidos que se sabe que producen los queratinocitos, podría haber más de uno con efecto autocrino.

El papel de los aloinjertos de cultivo en la curación de las úlceras crónicas podría explicarse mejor en los términos siguientes: en la parte profunda de una úlcera, persistirían acúmulos de queratinocitos asociados a los folículos pilosos o glándulas sudoríparas; siendo las condiciones de la base de la úlcera desfavorables para la migración y proliferación de los queratinocitos, las células no se extenderían ni cubrirían la herida, pero tampoco se destruirían; cuando se produjera la estimulación apropiada por los factores de crecimiento autocrino, comenzarían a proliferar y emigrar; otra respuesta similar en los múltiples queratinocitos que bordean la herida restringiría su perímetro.

La acción de mediadores químicos que parece ser responsable de la curación de las úlceras crónicas probablemente sea también útil en cualquier otro tipo de heridas donde pervivan los queratinocitos. Pienso en las quemaduras profundas de segundo grado, con frecuentes problemas de curación, en las que, no obstante, la parte más honda de los folículos pilosos y de las glándulas sudoríparas aporta todavía queratinocitos; pues bien, se ha demostrado que la aplicación de aloinjertos cultivados promueve la curación de estas heridas, así como de las producidas por la eliminación de los injertos de piel convencionales. Obviamente, allí donde aparezca un defecto epidérmico por causas subyacentes, la curación subsiguiente quizá no sea definitiva: la superficie curada quedará sujeta a fallos recurrentes, siempre que no se remedien las causas profundas.

Los cultivos para el tratamiento de las heridas de tercer grado deben hacerse "por encargo", puesto que la biopsia proviene del propio paciente. Los cultivos alogénicos pueden prepararse de cualquier donante. Una fuente práctica de células epidérmicas con buen crecimiento potencial es la piel proveniente de la circuncisión de niños sanos recién nacidos. Los cultivos derivados de esta epidermis pueden someterse a pruebas exhaustivas para eliminar cualquier contaminación microbiana y certificar su absoluta garantía sanitaria. Las células se conservan a la temperatura del nitrógeno líquido y se cultivan cuando se precisa un injerto. Cabe incluso preparar cultivos injertables y crioconservarlos. Tales injertos podrían almacenarse en hospitales, a disposición inmediata de una intervención quirúrgica urgente.

El dominio del cultivo de queratinocitos nos ha enseñado a emplearlos en terapéutica. Aunque esta experiencia no puede extenderse automáticamente a otros tipos celulares y nuevas aplicaciones, es forzoso pensar en las oportunidades que abre; espigando entre varias: empleo de células endoteliales de cultivo para tapizar prótesis vasculares; aplicación de células uroteliales cultivadas a la reparación del tracto urinario, recurso a cultivos de células de islotes pancreáticos para salir al paso de la diabetes, uso de cultivos de células hepáticas para proporcionar funciones hepáticas o cultivo de mioblastos para tratar enfermedades musculares.

Para convertir en realidad esa gavilla de aplicaciones, habrá que esperar saltos cualitativos en nuestro conocimiento de los procesos. La escasa proclividad de las células hepáticas y de los islotes pancreáticos para crecer en cultivo constituye un freno importante. Mientras que las células endoteliales derivadas del cordón umbilical crecen bien, las que proceden de humanos adultos no. Y aunque los mioblastos humanos se adaptan a las condiciones de cultivo, no sirven para generar músculo, debido a la compleja organización celular del músculo y la dificultad para introducir los mioblastos en la localización adecuada.

Queda pendiente todavía una aplicación verosímil: la de las células de cultivo a la terapia génica. Células que sintetizan un producto del que se carece en el organismo, como una hormona o una enzima, podrían injertarse en el cuerpo humano y aportar la sustancia demandada. Nos es dado introducir ya, en células de cultivo, genes exógenos, que se transcriben y determinan la síntesis del metabolito buscado.

Ocurre con frecuencia que los genes que se expresan sin problemas en células de cultivo, se muestran remisos a expresarse una vez injertadas las células, debido quizás a que los genes transferidos a un tejido diferenciado adolecen de algún tipo de represión que no se ejerce mientras las células están en cultivo. Queda mucho por averiguar sobre la manera en que los vectores pueden maximizar su expresión y sobre el tipo de células que pueden cultivarse y transplantarse para que generen una masa adecuada de tejidos cuyos productos, derivados de un

gen exógeno, alcancen el punto o sitio adecuado en la cuantía correcta.

Hay en el mundo más de medio millar de pacientes que han recibido queratinocitos cultivados para el tratamiento de quemaduras, úlceras y otras dolencias. Una cifra mínima, si la comparamos con el número de pacientes quemados o afectados de úlceras crónicas, etc.; se deja sentir, en efecto, una gran demanda de queratinocitos de cultivo. A medida que se vaya abriendo la gama de tipos celulares en cultivo se irán diseñando, sin duda, nuevas aplicaciones prácticas. Cierto es que se conocen, desde hace años, los componentes necesarios de un medio idóneo para establecer líneas celulares y fibroblastos; pero ese medio no sirve para que se desarrolle la inmensa mayoría de tipos celulares normales. No es fácil mejorar la capacidad de un tipo celular para crecer en cultivo, pues no existen recetas de validez general. Hemos de ahondar bastante más en la biología de cada tipo celular y en los procesos peculiares de su cultivo. Sin olvidar un último golpe: el de suerte, intuición o agudeza, como quiera llamársele.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SERIAL CULTIVATION OF STRAINS OF HUMAN EPIDERMAL KERATINOCYTES: THE FORMATION OF KERATINIZING COLONIES FROM SINGLE CELLS. James G. Rheinwald y Howard Green en *Cell*, vol. 6, n.º 3, páginas 331-344; noviembre de 1975.

GROWTH OF CULTURED HUMAN EPIDERMAL CELLS INTO MULTIPLE EPITHELIA SUITABLE FOR GRAFTING. Howard Green *et al.* en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 76, n.º 11, págs. 5665-5668; noviembre de 1979.

GRAFTING OF BURNS WITH CULTURED EPITHELIUM PREPARED FROM AUTOLOGOUS EPIDERMAL CELLS. Nicholas E. O'Connor *et al.* en *Lancet*, vol. 1, n.º 8211, páginas 75-78; 10 de enero de 1981.

PERMANENT COVERAGE OF LARGE BURN WOUNDS WITH AUTOLOGOUS CULTURED HUMAN EPITHELIUM. G. Gregory Gallico III *et al.* en *New England Journal of Medicine*, vol. 311, págs. 448-451; 16 de agosto de 1984.

RECONSTITUTION OF STRUCTURE AND CELL FUNCTION IN HUMAN SKIN GRAFTS DERIVED FROM CRYOPRESERVED ALLOGENEIC DERMIS AND AUTOLOGOUS CULTURED KERATINOCYTES. Robert C. Langdon *et al.* en *Journal of Investigative Dermatology*, volumen 91, n.º 5, págs. 478-485; noviembre de 1988.

SKIN REGENERATED FROM CULTURED EPITHELIAL AUTOGRAFTS ON FULL-THICKNESS BURN WOUNDS FROM 6 DAYS TO 5 YEARS AFTER GRAFTING: A LIGHT, ELECTRON MICROSCOPIC AND IMMUNOHISTOCHEMICAL STUDY. Carolyn C. Compton *et al.* en *Laboratory Investigation*, vol. 60, número 5, págs. 600-612; mayo de 1989.

Alfred Tarski y su contribución a la teoría de conjuntos

La obra de Tarski se enmarca en el contexto de la eclosión de nuevas teorías en lógica y en matemática que arrancan de Georg Cantor y se desarrollaron con especial vigor en la primera mitad de nuestro siglo

Josep Pla i Carrera

La obra lógico-matemática de Alfred Tarski se halla enmarcada en el nacimiento y primeros pasos de nuevas teorías. Van éstas desde la teoría de conjuntos hasta la de la recursividad, pasando por los primeros resultados de lo que, con el tiempo, será la teoría de modelos, sin olvidar la algebraización de las estructuras matemáticas subyacentes a la propia lógica. Tarski dedicará sus esfuerzos a esclarecer, precisar, completar y, en ocasiones, iniciar todos estos ámbitos de la lógica matemática y de las propias matemáticas. Aquí nos limitaremos a algunas de las cuestiones estudiadas y profundizadas por él relativas a la teoría de conjuntos.

El nacimiento de la lógica matemática desde Gottlob Frège (1848-1925) se vincula con la necesidad de fundamentar la matemática en la lógica, para salvarla de los riesgos de la intuición. La crisis planteada con la aparición de las geometrías no euclídeas, geometrías en las que desde un punto exterior a una recta es posible trazar más de una paralela y geometrías en las que desde un punto exterior a una recta no era posible trazar ninguna paralela, era una crisis que cuestionaba la intuición geométrica como camino (el único y canónico) para el desarrollo de las matemáticas. (La geometría euclídea admite que sólo cabe trazar una paralela por un punto exterior a una recta.)

Junto a esa crisis geométrica apareció la crisis numérica o algebraica. El álgebra, nacida en el Islam, encontró su lugar ideal en las matemáticas comerciales del Renacimiento y cobraría especial auge en pocos siglos. Pero fue alejándose de sus orígenes algorítmicos para adentrarse en un mundo abstracto donde imperaban las estructuras: números negativos, números complejos, enteros de Gauss, cuaterniones, vectores, matrices, ideales de Dedekind.

Hubo una tercera crisis, que haría tambalear la parte que sustentaba los logros científicos de los siglos XVII al XIX y que constituía el éxito de las matemáticas como *philosophia naturalis*: el análisis matemático, rama que tenía su talón de Aquiles en el concepto de los infinitésimos. El análisis estudiaba el comportamiento de las principales funciones elementales y permitía establecer los principios básicos de la mecánica racional; mas, para esto, era preciso recurrir a las propiedades algebraicas y topológicas de los números reales, y los matemáticos no dispusieron de una construcción rigurosa de éstos hasta finales del siglo XIX.

La triple crisis sólo se superaría con una epistemología de las matemáticas que precisara la naturaleza de éstas, cómo debía proceder en la obtención de sus resultados, sus verdades y teoremas y cómo establecer sus objetos. En particular, debía precisar el significado de la existencia de los objetos matemáticos, el alcance y la naturaleza de la verdad en matemáticas y su lenguaje.

Surgieron tres escuelas: el logicismo, el formalismo y el intuicionismo. Mientras, se iba asentando una metodología común de trabajo: el uso creciente de la teoría intuitiva de conjuntos. De las tres escuelas, se impondría el formalismo de David Hilbert. Afirma que, para cada rama de las matemáticas, podemos dar un lenguaje con el que enunciar formalmente las expresiones matemáticas de dicha rama. Ese formalismo debía permitir, de manera mecánica y finita, deducir de unos axiomas, "ad hoc" para cada una de las ramas de la matemática, todas las verdades relativas a aquel dominio: su corpus o teoremas. Esta postura perdura todavía, si bien subsumida en el formalismo de la teoría axiomática de conjuntos.

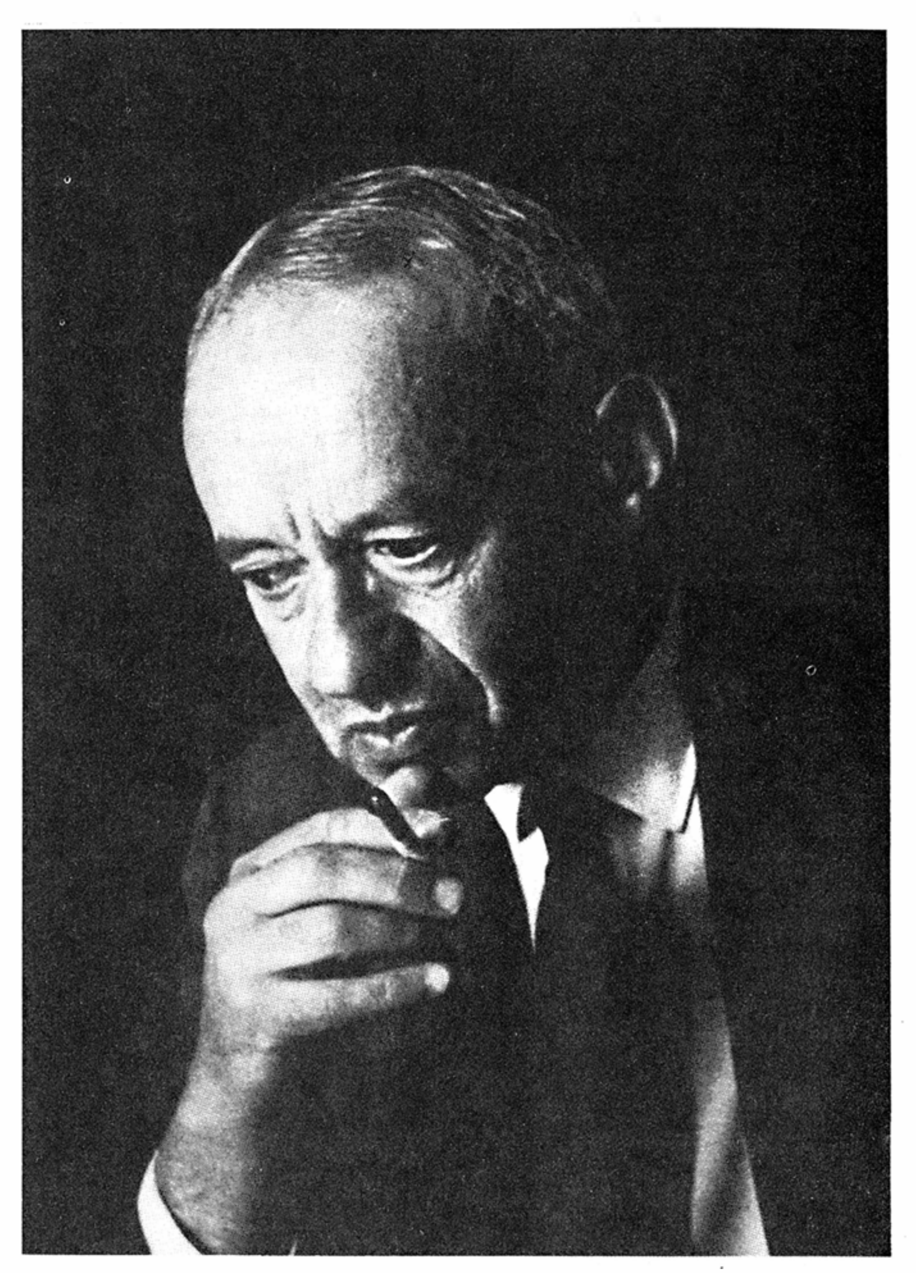
Se impondría también una metodología, la teoría intuitiva de conjuntos. Los matemáticos del siglo XIX manejan ciertos conjuntos de objetos como si fueran objetos matemáticos reales. Dichos conjuntos serán, en general, infinitos y, con ellos, se entrará en el "paraíso del que ya nadie nos podrá echar jamás", en palabras de Hilbert, pero que, como todo buen paraíso, llevará en su interior una serpiente venenosa, el infinito.

Georg Cantor, ferviente partidario de la teoría de conjuntos, se ocupó en un comienzo del conjunto de los números reales, preocupado, sobre todo, por medir la talla de los distintos conjuntos posibles de números reales; para ello creó la noción de equipotencia y la de cardinal. Pensemos en dos conjuntos finitos. Si queremos saber si tienen la misma talla, podemos asociar a cada elemento del primero un único elemento del segundo conjunto y, si logramos aparear todos los elementos del primer conjunto con todos los elementos del segundo y recíprocamente, podremos afirmar que ambos conjuntos tienen la misma cantidad de elementos, podremos decir que son equipotentes. Hay otra manera de proceder: contar los elementos de uno y otro conjunto y obtener sendos números, su cardinal; si los cardinales coinciden, diremos que los conjuntos poseen la misma cantidad de elementos.

JOSEP PLA I CARRERA pertenece al departamento de lógica, historia y filosofía de la ciencia de la Universidad de Barcelona, en cuya facultad de matemáticas da clases. Experto en lógica matemática, ha investigado la influencia de Tarski en la teoría de conjuntos.

Estas dos formas difieren en lo siguiente: en la primera basta con disponer de una ley que permita asociar los conjuntos, sin que se precise hacerlo realmente; en la segunda, sí hay que terminar la operación para conocer el número de elementos del conjunto. Esta diferencia es importante cuando pretendemos comparar las magnitudes o tallas de dos conjuntos infinitos, en cuyo caso la segunda forma no parece adecuada, porque no se ve que sea posible agotar la cuenta de un conjunto infinito, pero sí es adecuada la primera, porque dos conjuntos —finitos o no— tendrán la misma cantidad de objetos —la misma potencia— si cabe establecer una correspondencia entre los objetos de uno y otro.

Cantor eligió la primera forma para establecer la equipotencia de dos conjuntos arbitrarios. Pero, ¿tenía sentido pensar que existen conjuntos infinitos? La pregunta reabría una vieja cuestión epistemológica: la existencia de los objetos matemáticos. Y, en caso de existir conjuntos infinitos, ¿tienen todos la misma cantidad de elementos o hay distintos tipos de infinitos, distintas potencias? ¿Podemos crear un número nuevo que cuente la cantidad de elementos de los conjuntos y que sea el mismo cuando se trate de conjuntos equivalentes?



1. ALFRED TAJTELBAUM TARSKI (Varsovia, 1902- Berkeley, 1983). Entró, muy joven, en contacto con miembros del círculo lógico de Varsovia, en particular con Jan Lukasiewicz. En los años veinte publicó un estudio sobre los sistemas deductivos, piedra angular de la lógica algebraica. En la década siguiente se adentró en la semántica. En 1939 emigró a los Estados Unidos y formó en torno a su cátedra en la Universidad de Berkeley un grupo escogido de lógicos (Leon Henkin, Dana Scott, Donald Monk, Jerome Keisler, Julia Robinson y Robert L. Vaught, entre otros).

A propósito de la segunda cuestión, Cantor había establecido que había tantos números naturales cuantos números enteros, cuantos números fracionarios y cuantos números algebraicos. Los conjuntos infinitos poseían, diríase, la misma talla. Lo cual no es cierto, según adelantara ya el propio Cantor mediante su método de la diagonal: el conjunto $\mathbb{R}$ de los números reales tiene más elementos que el conjunto $\mathbb{N}$ de los números naturales. Aparecían así dos tipos de potencias distintas que correspondían a dos conjuntos infinitos concretos: el numerable medía la potencia de los conjuntos equipotentes a $\mathbb{N}$ y el continuo medía la potencia de los conjuntos equipotentes a $\mathbb{R}$.

Planteábase entonces si esos dos tipos de infinito eran sucesivos o cabía en medio un tercer tipo. ¿Debe cualquier subconjunto infinito de números reales ser numerable o continuo? ¿Acaso puede corresponder a otro tipo? Para Cantor no había más conjunto infinito que el numerable o el continuo. A éste pertenecía el conjunto de números reales trascendentes; pero Cantor no pudo demostrar la *hipótesis del continuo* (HC), que así es como se llama su conjetura.

Observó, además, que el conjunto $\mathcal{P}(\mathbb{N})$ de todos los subconjuntos del conjunto $\mathbb{N}$ era equipotente al conjunto de los números reales. Se dio cuenta de que al considerar el conjunto $\mathcal{P}(\mathbb{N})$ se obtenía un conjunto cuya potencia era mayor que la del conjunto $\mathbb{N}$; vio, también, que esa potencia, infinita, era inmediata superior a la potencia del conjunto $\mathbb{N}$, puesto que $\mathcal{P}(\mathbb{N})$ tiene la potencia de $\mathbb{R}$ que, según Cantor, posee la potencia que sigue a la del conjunto $\mathbb{N}$.

Cabría preguntarse si esos dos resultados que, por el momento, se restringen a $\mathbb{N}$ y $\mathbb{R}$, pueden generalizarse a cualquier conjunto infinito. Es decir, si X es un conjunto infinito, el conjunto $\mathcal{P}(X)$ de todos sus subconjuntos, ¿tiene potencia mayor que el conjunto X? Y, de ser así, ¿es inmediata superior esta potencia a la del conjunto X? Las respuestas a estas dos preguntas son muy distintas. La primera, afirmativa, constituye el teorema de Cantor, según el cual el conjunto $\mathcal{P}(X)$ de las partes de un conjunto X tiene siempre una potencia mayor que el conjunto X. La respuesta a la segunda pregunta constituye la *hipótesis general del continuo* (HGC); se afirma su veracidad, pero como condición.

Hemos visto que hay conjuntos infinitos que tienen distinto tipo de infinitud. Pero esto sólo significa que

no son coordinables o equipotentes. No se nos enseña la manera de medir su número de elementos. Podríamos razonar así: para cada conjunto X, consideremos la colección de todos los conjuntos equipotentes a dicho conjunto, y tomar esta colección como el ente abstracto —un nuevo número— que mide la potencia del conjunto X. Esa idea ofrece dos inconvenientes; primera, al considerar como cardinal de un conjunto X la colección de todos los conjuntos equipotentes con X, nos alejamos de la intuición del caso finito, en donde el cardinal se mide recurriendo, no a la colección de todos los conjuntos con ese número finito de elementos, sino a un conjunto concreto que tiene precisamente dicho número de elementos y que sirve para representar, por sí solo, a todos los de la colección.

El segundo inconveniente lo puso sobre la mesa Bertrand Russell, en 1903, con su famosa paradoja. Para Frege, un conjunto era la extensión de un predicado; cualquier predicado definía un conjunto: "el conjunto de todos los objetos aceptables que satisfacen ese predicado". Russell demostró la falsedad de esa aserción, a través de su paradoja. Considérese el predicado "ser un conjunto que no se pertenece a sí mismo", y aplíquese el criterio de Frege; se obtendrá "el conjunto de todos los conjuntos que no son elementos de sí mismo", y preguntémonos si este nuevo conjunto se pertenece a sí mismo o no; veremos que, en cualquiera de los casos, obtenemos una contradicción. Esta dificultad es insalvable si deseamos mantenernos en el seno de la teoría de conjuntos, puesto que la colección de todos los conjuntos "equipotentes a un conjunto dado" no es un conjunto. Es una clase propia.

Esta dificultad haría pensar en volver la vista hacia el caso finito, en el cual se utiliza un representante idóneo que caracterice a toda la colección y sea, a la vez, miembro de ésta. Al no poder doblegar la dificultad, los lógicos postulaban axiomáticamente su existencia: para cada conjunto X, se imponía axiomáticamente la existencia de un nuevo conjunto card (X) equipotente a X. Estos objetos, los números cardinales, debían cumplir la siguiente propiedad: si dos conjuntos X e Y son equipotentes, los números card (X) y card (Y) deben ser iguales y sirven de representantes.

John von Neumann estableció que tales objetos existían en el seno de la teoría de conjuntos, siempre que se aceptase el axioma de la elección. La definición de cardinal de un conjunto dada por von Neumann se basaba en

GEOMETRIAS EUCLIDEA Y NO-EUCLIDEAS

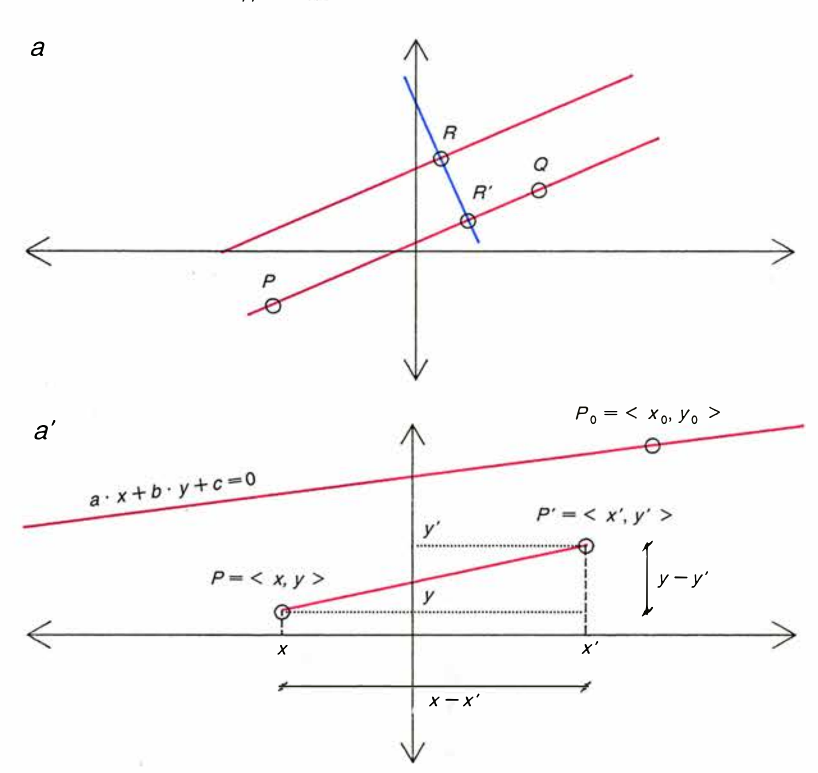
Entendemos por línea recta o geodésica de una superficie la línea de la superficie que tiene menor distancia entre dos puntos. Esta definición de línea recta requiere de una métrica que permita medir la distancia entre cada par de puntos de la superficie. En la figura (*a*) se ofrece un modelo de la geometría euclídea plana. Este modelo consiste en el plano $\mathbb{R}^2$; en él, un punto P es un par de números reales [es decir, $P = (x,y)$]; una recta r es el conjunto de puntos que satisfacen una ecuación lineal $a \cdot x + b \cdot y + c = 0$ [es decir, $r = \{(x,y) : a \cdot x + b \cdot y + c = 0\}$]; una recta r pasa por un punto $P_0 = (x_0,y_0)$ si, y sólo si, las coordenadas x_0,y_0 del punto P_0 satisfacen la ecuación de la recta r [es decir, $a \cdot x_0 + b \cdot y_0 + c = 0$]. Finalmente, dos rectas r y r' son paralelas si, y sólo si, carecen de puntos comunes [es decir, si, y sólo si, el sistema de ecuaciones

$$a \cdot x + b \cdot y + c = 0, \quad a' \cdot x + b' \cdot y + c' = 0$$

carece de solución; es decir, si, y sólo si, $a/a' = b/b'$].

En este modelo las líneas rectas son infinitas e ilimitadas. La distancia entre dos puntos cualesquiera $P = (x,y)$, $P' = (x',y')$ nos la da el teorema de Pitágoras:

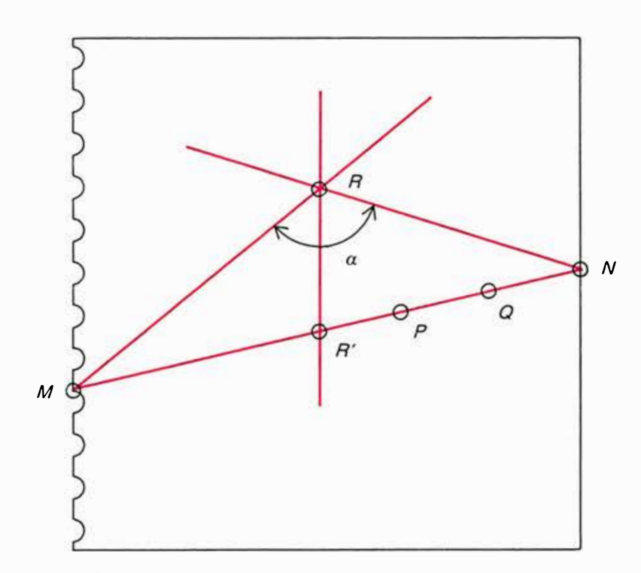
$$d_{pp'} = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2}\,.$$



Ahora imaginemos una simple hoja arrancada de un bloc y en ella hagamos geometría plana, pero sin salirnos de ella. En este ejemplo, que es una modificación didáctica del modelo de Felix Klein, hay que imponer ciertas cuestiones técnicas: sólo debemos considerar el interior de la hoja de papel; es decir, los puntos del borde no pertenecen ya a nuestro modelo geométrico. Además hay que imponer una métrica que haga infinitas las líneas rectas, a pesar de hallarse contenidas en una hoja de papel que las limita. Esta métrica es la siguiente: "la distancia entre dos puntos cualesquiera P y Q viene dada por el logaritmo de la razón doble de los cuatro puntos P, Q, M y N [si bien estos dos últimos no pertenecen a nuestro modelo]:

$$d_{PQ} = \ln\left[\frac{QM}{QN} : \frac{QM}{QN}\right],"$$

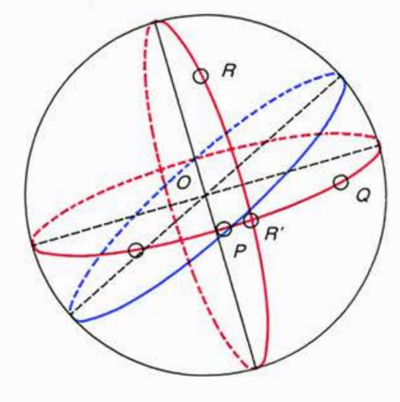




En la figura (b), desde el punto R podemos trazar un ángulo $\widehat{MRN} = \hat{\alpha}$; los lados de este ángulo no cortan a la recta $PQ = r$ [ya que los puntos M y N –puntos del borde de nuestra hoja de papel– no pertenecen ya a nuestra geometría]. Son pues paralelos a la recta r. Todas las rectas interiores al ángulo $\hat{\alpha}$ cortan a la recta r y, por consiguiente, no son paralelas a r. En cambio, las rectas exteriores al ángulo $\hat{\alpha}$ son paralelas a la recta PQ.

Tenemos pues un modelo en el cual las líneas rectas son ilimitadas [carecen de extremos] y son infinitas respecto a la métrica que hemos definido más arriba, pero en cambio son finitas si las medimos con la métrica [pitagórica] usual.





En la figura (c) la superficie que se considera es una esfera. En ella las rectas –las geodésicas– que pasan por dos puntos cualesquiera P y Q son los círculos máximos que pasan por P y Q.

Si R es un punto que no pertenece al círculo máximo PQ –es decir, exterior a la recta que pasa por los puntos P y Q–, cualquier recta –cualquier círculo máximo de la esfera– que pase por R cortará necesariamente a la recta que pasa por los puntos P y Q.

Disponemos, pues, de un modelo en el cual las rectas son ilimitadas –carecen de límites– pero, en cambio, son finitas.

En geometría podemos pues considerar tres casos que podríamos esquematizar con los ejemplos siguientes: finito y limitado, infinito e ilimitado, y finito e ilimitado

la teoría de los números ordinales y, para poder asociar a cada conjunto su cardinal, precisaba que todo conjunto se pudiera bien ordenar. El axioma de la elección (AC) establece que, dada una partición de un conjunto, existe un conjunto formado por un solo elemento de cada una de las partes de la partición. De hecho, se elige un elemento de cada una de las partes y, con los escogidos, se forma un conjunto; la dificultad de este axioma estriba en que no precisa cómo se eligen los elementos; no se dispone de una ley que diga cómo hay que hacer la elección. Se limita a afirmar la posibilidad de elección a pesar de no saber cómo se realiza.

Dejando de lado las discusiones epistemológicas que este axioma suscitó entre defensores y detractores, centraremos nuestra atención en un resultado matemático relativo a la existencia de conjuntos no-medibles de Lebesgue, que preocupó a los analistas franceses del siglo XIX.

En 1905, Giuseppe Vitali, utilizando el axioma de la elección, demostraba que había subconjuntos de $\mathbb{R}$ que eran no-medibles de Lebesgue. Unido ello a razones de orden epistemológico, varios matemáticos se vieron forzados a rechazar el AC, o, cuando menos, a poner el acento en la conveniencia de profundizar en el mismo. A pesar de que este axioma se había utilizado antes de 1905, Lebesgue es contundente al afirmar que "no es posible construir nada con solidez, salvo que se demuestre la existencia de un objeto definiéndolo" con un número finito de palabras.

Zermelo saldrá al paso de todas estas objeciones defendiendo la necesidad del AC, para el buen desarrollo de la teoría de conjuntos y para un fecundo desarrollo de las matemáticas. Pero el paso más importante lo daría E. Steinitz, en 1910, al observar que, para establecer la unicidad de la extensión algebraicamente cerrada de un cuerpo, era imprescindible utilizar el axioma de la elección.

Así las cosas, el único camino razonable para decidir a favor o en contra del AC consistía en profundizar sus consecuencias en teoría de conjuntos o en matemáticas y en reconocer sus equivalencias. En 1918 Waclaw Sierpinski propuso como programa buscar consecuencias y equivalencias del axioma de la elección que pusiesen de manifiesto su necesidad e importancia.

Hemos hablado de conjuntos infinitos, pero no hemos definido todavía qué es un conjunto infinito. La preocupación por la infinitud de los conjuntos y su existencia reaparece en el siglo XIX con las aportaciones de Bol-

zano, Dedekind y Cantor. Aportaciones que plantean, a su vez, dos cuestiones centrales, una de orden ontológico (¿qué es un conjunto infinito?) y otra de orden epistemológico (¿existen conjuntos infinitos?).

Al paso de la primera cuestión salieron dos definiciones de conjunto infinito. La de Bolzano-Cantor procede por negación y precisa del concepto de número natural. Dice: "un conjunto es finito si, y sólo si, es equipotente a cierto número natural". Esta definición presupone la existencia de números naturales, puesto que se requiere disponer de todos los números naturales para saber si un conjunto dado es o no es equipotente a un número natural. Esta definición, por negación, permite dar una definición de conjunto infinito que llamaremos conjunto no-finito: "un conjunto es no-finito si, y sólo si, no es finito". Ahora bien, puesto que estamos suponiendo que existe el conjunto $\mathbb{N}$ de los números naturales, resulta evidente que hay conjuntos no-finitos.

La segunda definición —de Bolzano-Dedekind— no precisa de los números naturales. Dice: "un conjunto X es infinito si, y sólo si, es equivalente a uno de sus subconjuntos propios". Pero, ¿existen conjuntos infinitos? Para definir los conjuntos infinitos no es preciso suponer la existencia de $\mathbb{N}$ y, por consiguiente, no es preciso que exista ningún conjunto infinito. ¿Podría ocurrir, pues, que estuviésemos definiendo algo cuya existencia no pudiese ser comprobada? Digamos, de momento, que, si se acepta la existencia de $\mathbb{N}$, tendremos también resuelto el problema de la existencia de conjuntos infinitos, puesto que $\mathbb{N}$ es infinito. Mas tal existencia no es anterior a la definición en el orden epistemológico, sino posterior a ella, y sirve sólo para garantizar la existencia de conjuntos infinitos, es decir, sirve para garantizar que hemos definido un objeto que, en el reino de las matemáticas, tiene realidad.

Lo mismo Bolzano que Dedekind fueron conscientes de la necesidad de establecer la existencia de los conjuntos infinitos. Nos encontramos entonces con una situación curiosa: si queremos que existan conjuntos —ya sean no-finitos, ya sean infinitos— debemos admitir su existencia o, por lo menos, que exista $\mathbb{N}$, que es, a la vez, no-finito e infinito.

La cuestión que se plantea entonces es la siguiente: aceptando que existan conjuntos infinitos distintos de $\mathbb{N}$ de uno de ambos tipos, ¿existen conjuntos infinitos del otro tipo? Los conjuntos no-finitos e infinitos, ¿son los mismos? Es decir, ¿coinciden ambos conceptos de infinitud y, por tanto, ambas definiciones? Dedekind estableció la respuesta afirmativa, opinión que compartía con Cantor, en 1888, si bien su demostración requiere el axioma de la elección. Es decir, si no aceptamos el AC habrá distintos tipos de infinitud y, consiguientemente, de finitud: habrá conjuntos mayores que cualquier conjunto finito, pero que no serán infinitos.

En los años veinte de nuestro siglo Whitehead y Russell habían publicado ya los *Principia mathematica*, Hilbert había planteado sus célebres problemas, Sierpinski había lanzado su reto y publicado su trabajo de 1918, von Neumann estaba a punto de introducir el concepto de cardinal de un conjunto, basándose en el AC, y Hilbert tenía afinadas sus ideas acerca del formalismo, mientras que Fraenkel estaba elaborando la axiomática de la teoría de conjuntos, fundada en los trabajos de Zermelo. En ella las ideas de Frege y Cantor iban a encontrar un cauce adecuado para su desarrollo, el cual iba a suponer un nuevo impulso para las matemáticas entendidas como un formalismo, basado en teoría de conjuntos. El avance de la lógica matemática y el de la teoría de conjuntos sería imparable.

En este contexto, Tarski realizará sus aportaciones, que se centrarán fundamentalmente en llevar a las últimas consecuencias el programa de Sierpinski: profundizar en las limitaciones que podría suponer la aceptación del AC, y ver a qué deberían renunciar los matemáticos si lo rechazaban.

Una de las primeras aportaciones de Tarski, realizada junto con Stephen Banach, cuestionaba la aceptación del axioma de la elección, por cuanto presentaba consecuencias paradójicas. La paradoja de Banach-Tarski establece que es posible descomponer una bola en un cierto número de piezas que se pueden recomponer de forma tal que se obtengan dos bolas de la misma medida que la bola original.

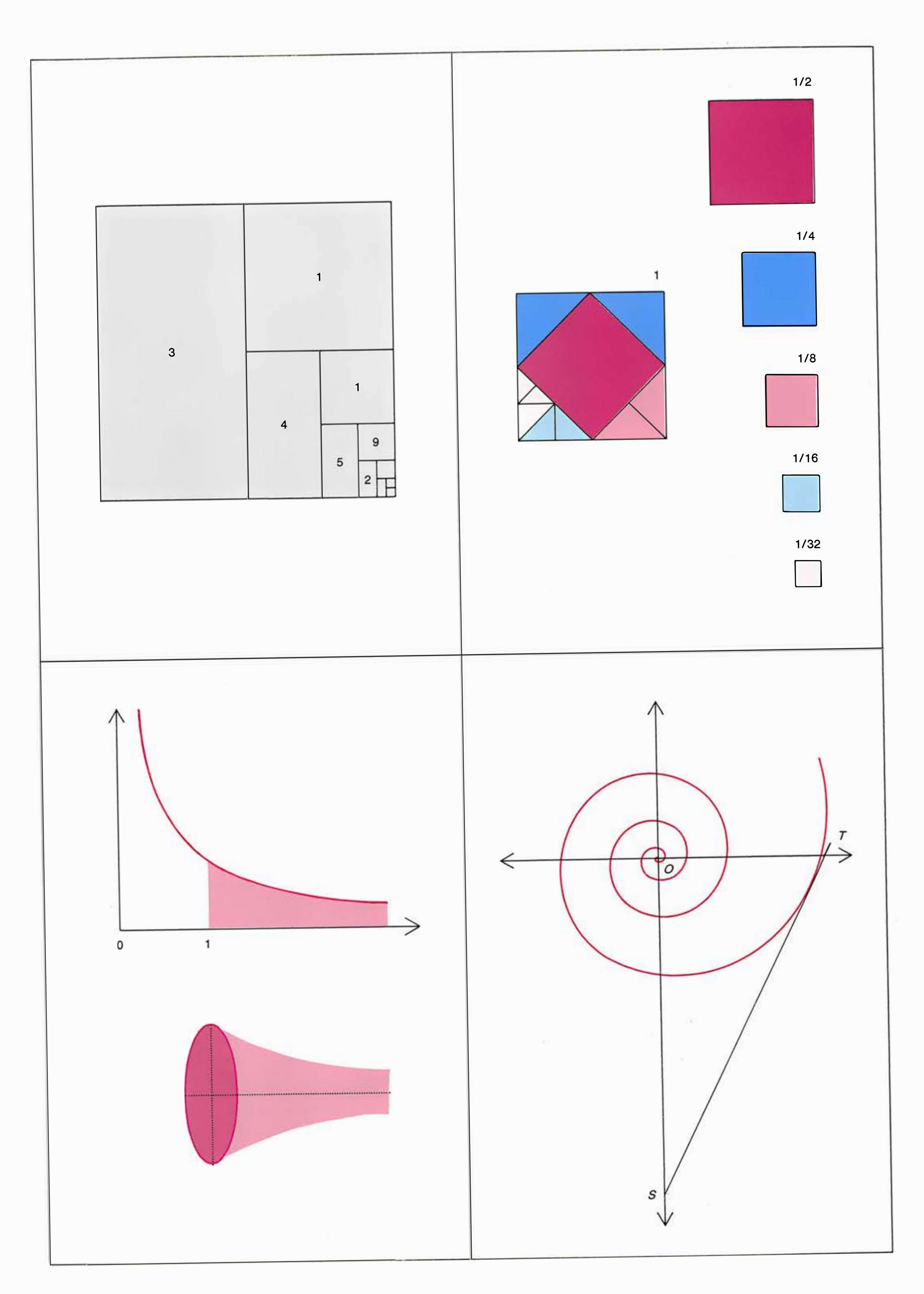
La paradoja que se le ofrece a la intuición estriba en el hecho siguiente: reorganizando convenientemente las piezas de una bola de radio r, se obtiene una bola de radio $r\sqrt{2}$; se dobla el volumen. Ello es posible debido a que las piezas en que se descompone la esfera de radio r no son medibles de Lebesgue —carecen de volumen— y, al recomponerse, no tienen por qué respetar algo, el volumen, que no afecta a las partes.

En 1926, Alfred Tarski y Adolf Lindenbaum publicaron una memoria relativa a la teoría de conjuntos; en ella, el segundo ofrecía tres formulaciones alternativas —H_1, H_2 y H_3— de la hipótesis general del continuo y afirmaba que, con el axioma de la elección, los tres enunciados eran equivalentes. Afirmaba, además, que cada una de estas formulaciones de la HGC implicaba el AC. Se vinculan, pues, dos de los postulados de la teoría de conjuntos hasta entonces independientes.

En 1947, Sierpinski estableció que H_1 implicaba el AC, y en 1960 Rubin hacía lo propio con H_3. En 1938 Kurt Gödel había asentado la consistencia de ambos axiomas —el AC y la HGC— con el resto de axiomas de la teoría de conjuntos. La independencia de dichos axiomas con el resto de axiomas de la teoría de conjuntos la establecería Cohen en 1963.

Una de las preocupaciones de Tarski fue, siguiendo el programa de Sierpinski, hallar consecuencias del AC. Von Neumann introdujo el concepto de número cardinal y, aceptando el AC, lo usó para medir la potencia de cada conjunto. Los números cardinales generalizaban la noción de número de elementos de un conjunto finito. Pero los números finitos poseen una aritmética: se pueden sumar y multiplicar. ¿Cómo trasladar estas operaciones a los números cardinales? Un camino posible consistía en pasar por una aritmética de los conjuntos. Si X e Y son dos conjuntos con m y n elementos, respectivamente, y carentes de elementos comunes, el conjunto reunión, $X \cup Y = \{z{:}z \in X \text{ o } z \in Y\}$, tiene exactamente $m + n$ elementos. De forma parecida, el conjunto producto cartesiano de los conjuntos X e Y, $X \times Y = [(x,y)] : x \in X \text{ e } y \in Y$, tiene exactamente $m \times n$ elementos.

2. SE DAN CIERTAS PARADOJAS aparentes entre los conceptos de infinitud y de finitud, ya que se pueden presentar situaciones que se nos pueden antojar incluso contradictorias. La expresión decimal del número π, relación entre una circunferencia y su diámetro, es π = 3,141592..., y requiere de una infinidad de cifras; sin embargo, su valor es finito y puede ubicarse, mediante una pequeña triquiñuela, en un cuadrado finito (*arriba, izquierda*). Si juntamos los cuadrados de superficies 1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32..., obtendremos un cuadrado finito de superficie igual a 1 (*arriba, derecha*). La hipérbola equilátera de ecuación $y = 1/x$, en el segmento $(1, \infty)$, limita una superficie infinita; en cambio, al girar en torno al eje *OX* se obtiene una trompeta infinitamente larga, pero cuyo volumen es finito (*abajo, izquierda*). La espiral elíptica $\rho = a\theta$ es una espiral que se enrolla una infinidad de veces en torno del origen para ir de *T* a *O*; su longitud es igual a la longitud del segmento *TS*, que es claramente finito (*abajo, derecha*).


1
3
1
4
9
5
2
1/2
1/4
1
1/8
1/16
1/32
0
1
T
O
S

Estas operaciones conjuntistas, que se pueden efectuar con cualquier pareja de conjuntos, con independencia de su cardinal y con independencia del AC, nos permiten introducir la aritmética cardinal. Si se desea conocer la suma de dos números cardinales, se procede de la forma siguiente: se buscan dos conjuntos, sin elementos comunes, X e Y que tengan, respectivamente, dichos cardinales; se construye el conjunto reunión $X \cup Y$ y se halla su cardinal, que, como sabemos, si disponemos del axioma de la elección existirá. Por definición, pues, $\mathrm{card}(X) + \mathrm{card}(Y) = \mathrm{card}(X \cup Y)$.

De forma análoga, el producto de dos cardinales es el cardinal del conjunto producto cartesiano de dos conjuntos X e Y de cardinales. Por definición, pues, el producto $\mathrm{card}(X) \times \mathrm{card}(Y) = \mathrm{card}(X \times \cup Y)$.

Una vez aceptada una aritmética cardinal, se plantea la necesidad de conocer sus propiedades: en lo concerniente a la suma cardinal, ¿es asociativa?, ¿es conmutativa?; en lo referente al producto cardinal, ¿cuáles son sus propiedades? Las respuestas a estas preguntas llevan, en algunos casos, a propiedades análogas a las que cumplen la suma y el producto de los números naturales; en otros casos, las propiedades son distintas. Citaremos algunas análogas: "si un cardinal es mayor que otro, existe diferencia"; "la suma y el producto son entonces isótonos y admiten leyes de cancelación". Ejemplo de propiedades diferentes son: "la suma de dos cardinales infinitos coincide con su producto", "el cuadrado de un número cardinal infinito coincide consigo mismo".

Si no se dispone del AC no es posible asignar, a cada conjunto, un número cardinal. Si se desea que ello sea posible hay que introducir el axioma del cardinal, que afirma que cada conjunto X admite un número cardinal $\mathrm{card}(X)$ que, además, le es equipotente. Por un razonamiento análogo podemos llegar a una aritmética cardinal; mas, al no disponer de AC, no es posible demostrar muchas de las propiedades aritméticas que se demostraban en la situación anterior.

A Tarski se le ocurrió preguntarse qué precio habría que pagar para que los cardinales, introducidos por medio del axioma del cardinal, poseyesen alguna de las propiedades aritméticas indicadas más arriba u otras. Sus múltiples aportaciones conducían al mismo resultado. Si los números cardinales, introducidos axiomáticamente, cumplían ciertas propiedades aritméticas, entonces era posible demostrar el AC. Así se establecía la equivalencia del AC con ciertas propiedades aritméticas de los cardinales, introducidos sin la elección.

En breve: para introducir el cardinal de cada conjunto, es preciso disponer del AC o del axioma del cardinal. ¿Cabe una definición alternativa de cardinal de un conjunto que no requiera ningún axioma distinto de los axiomas de la teoría ZF? La respuesta es afirmativa, como estableciera Tarski en 1955.

Para entender la forma de proceder de Tarski necesitamos la idea de rango de un conjunto X. Si analizamos la paradoja de Russell observaremos que generamos un conjunto cuya construcción depende del conjunto que se pretende definir; es decir, para fabricarlo, debemos recurrir a todos los conjuntos y, en particular, al propio conjunto que estamos creando. Esta solución se arreglaría si fabricásemos los conjuntos a partir de conjuntos ya construidos: esta idea pasa por catalogar los conjuntos en rangos.

Pero, ¿es posible clasificar todos los conjuntos en rangos? ¿En cuántos rangos? La respuesta a esas preguntas pasa por el establecimiento del axioma de la regularidad, según el cual todos los conjuntos están clasificados según ciertos rangos y, de acuerdo con el cual también, los elementos de un conjunto tienen siempre rango inferior que el del conjunto al que pertenecen. En forma simbólica: si $x \in X$, entonces $\rho(x) < \rho(X)$, siendo $\rho(x)$, $\rho(X)$ los rangos de x y X, respectivamente. Si se dispone del axioma de regularidad, es imposible que un conjunto se pertenezca a sí mismo como elemento. Hay tantos rangos posibles cuantos números ordinales. Si fijamos un rango, todos los conjuntos de ese rango constituyen un conjunto; también forman conjunto los conjuntos de rango inferior a un rango dado.

Al no disponer del AC, no es posible garantizar que cada conjunto X admita un cardinal en el sentido de von Neumann; no obstante, usando el axioma de regularidad, Tarski define el cardinal de un conjunto. Si el conjunto X se puede bien ordenar, su cardinal se obtiene según indicara von

TEOREMA DE CANTOR E HIPOTESIS DEL CONTINUO

Cantor estableció dos *hechos* importantes:

$$(1) \quad \mathbb{N} < \mathcal{P}(\mathbb{N});$$
$$(2) \quad \mathbb{R} \sim \mathcal{P}(\mathbb{N});$$

y además conjeturó la *hipótesis del continuo*:

$$\text{HC: } \forall X\{\mathbb{N} \leq X \leq \mathbb{R} \rightarrow X \sim \mathbb{N} \vee X \sim \mathbb{R}\}.$$

Estos resultados se refieren tan sólo a conjuntos numéricos. Sin embargo, Cantor estableció, en general,

$$\forall X\{X < \mathcal{P}(X)\}$$

que, actualmente, se conoce con el nombre de teorema de Cantor; además conjeturó la *hipótesis general del continuo*:

$$\text{HGC: } \forall X \forall Z\{X \leq Z \leq \mathcal{P}(X) \rightarrow X \sim Z \vee X \sim \mathcal{P}(X)\}.$$

Demostración del teorema de Cantor:
Es claro que, para cada conjunto $X, X \leq \mathcal{P}(X)$. Para verlo basta considerar la siguiente aplicación inyectiva:

$$i: X \rightarrow \mathcal{P}(X), \quad x \mapsto \{x\}.$$

Supongamos ahora que X y $\mathcal{P}(X)$ fuesen equipotentes; resultaría entonces que dispondríamos de una biyección:

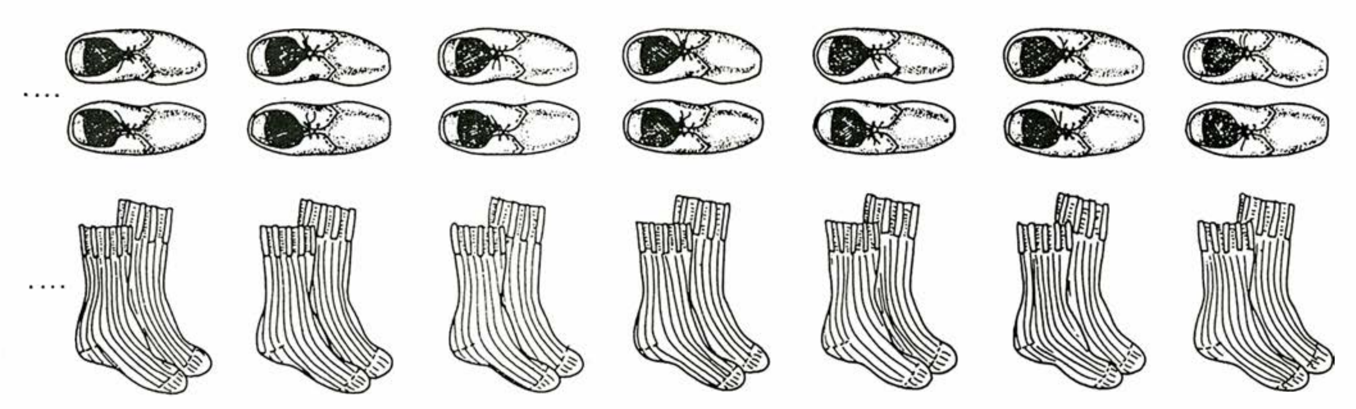
$$h: X \rightarrow \mathcal{P}(X), \quad x \mapsto h(x) \subseteq X.$$

Considérese entonces el conjunto $Y = \{x \in X : x \notin h(x)\}$. Este Y es un subconjunto del conjunto X y, por consiguiente, pertenece a $\mathcal{P}(X)$ y, puesto que la aplicación h es biyectiva, existe un $x_0 \in X$ tal que $h(x_0) = Y$. Ahora pueden darse dos situaciones:

- o bien $x_0 \in Y$ y entonces, en virtud de la definición del conjunto Y, $x_0 \notin h(x_0) = Y$. ¡Imposible!
- o bien $x_0 \notin Y$ y entonces, en virtud de la definición del conjunto Y, $x_0 \in h(x_0) = Y$. ¡Imposible!

Esta doble contradicción establece, pues, que no es posible que exista biyección alguna entre los conjuntos X y $\mathcal{P}(X)$. Por consiguiente,

$$\forall X\ \{X < \mathcal{P}(X)\}.$$



3. AXIOMA DE LA ELECCION. Supongamos que disponemos de un conjunto infinito de pares de zapatos, del que es posible escoger un zapato de cada una de las infinitas parejas y formar un nuevo conjunto. Nos faculta para ello el poder describir una elección con un número finito de instrucciones; basta, por ejemplo, elegir el pie derecho de cada pareja. Imaginemos también que contamos con un conjunto infinito de pares de calcetines; no es el mismo caso que el anterior, porque no hay distinción entre calcetín izquierdo y calcetín derecho, o lo que es lo mismo, no podemos establecer un criterio que nos permita elegir un calcetín de cada una de las parejas con un número finito de instrucciones. Ello no obsta, sin embargo, para que podamos aplicar el axioma de elección, que establece la existencia de un conjunto formado por un calcetín de cada pareja.

Neumann; pero si el conjunto X no se puede bien ordenar, su cardinal se obtendrá, siguiendo las ideas de Cantor, es decir, tomando en consideración la clase de todos los conjuntos equipotentes con X de rango mínimo.

Esta definición por casos es correcta y cubre la totalidad de los conjuntos, siempre que todo conjunto tenga rango; es decir, siempre que valga el axioma de regularidad. Si estos números cardinales, definidos en la teoría de conjuntos sin necesidad del axioma del cardinal ni de la elección, satisfacen las propiedades aritméticas expuestas anteriormente, entonces la teoría de conjuntos satisfará el AC.

Cabe sólo una posible objeción: ¿qué más da introducir el axioma del cardinal que imponer el axioma de regularidad? Para poder introducir sus números cardinales, Tarski debe recurrir a un axioma. No obstante, el axioma de regularidad es uno de los axiomas de la teoría usual de conjuntos y no añade nada nuevo a lo que es comúnmente aceptado. Con ello, también da un nuevo paso en el análisis de la dependencia que el AC tiene con otras propiedades de la teoría usual de conjuntos.

El axioma de regularidad establece que la totalidad de conjuntos admiten un rango en el cual se producen por primera vez. Si no se acepta dicho axioma, los conjuntos quedan clasificados en dos clases: unos con rango y los demás que carecen de él. La clase propia de todos los conjuntos con rango —el llamado universo de von Neumann— constituye un modelo de la teoría ZF de conjuntos.

La idea de modelo de una teoría formal le debe mucho a Tarski. En la mentalidad estricta del formalismo, los enunciados matemáticos son ciertas tiras de signos, dados de antemano, que se forman de acuerdo con reglas sintácticas, establecidas asimismo de antemano. Los signos y, de rebote, los enunciados matemáticos no son más que signos y tiras de signos, carentes de significado. En el formalismo estricto, un axioma (de la teoría axiomática de conjuntos, por ejemplo) es una cierta tira de signos, que se forma de acuerdo con ciertas reglas sintácticas y que se elige como axioma de acuerdo con las intuiciones que se tienen de lo que debe ser la teoría formal en cuestión (la teoría de conjuntos, por ejemplo) y de los resultados que esperamos obtener con ella; los únicos signos permitidos son los signos lógicos proposicionales: $\neg$, $\wedge$, $\vee$, $\rightarrow$, $\leftrightarrow$, los cuantificadores $\forall$, $\exists$, las variables $x, y, z..$, $X, Y, Z...$ y los signos propios de la teoría (en el ejemplo de la teoría de conjuntos, los signos propios son el de igualdad, $=$, y el de pertenencia, $\in$).

Para poder deducir los teoremas —tiras de signos, a su vez— se parte de los axiomas y se aplican de forma mecánica unas reglas de deducción muy precisas: el *modus ponens* y el principio de generalización. Así se obtienen los teoremas de la teoría formal. Es claro, pues, que los teoremas de una teoría, una vez se han fijado el lenguaje y las reglas de construcción de frases, dependen de los axiomas de la teoría y de las reglas de deducción permitidas.

El mecanismo expuesto en el párrafo anterior presenta una limitación importante: carece de semántica. Quiere ello decir que los teoremas no significan nada, no predican nada de objetos concretos. Los teoremas son teoremas porque se han deducido formalmente en el seno de la teoría, pero carece de sentido decir que son verdaderos: no tienen referente.

Con la aparición de las geometrías no euclídeas los matemáticos observaron que la geometría no era algo absoluto, sino que dependía de la superficie en la que se hacía geometría. Una misma frase formal, leída en un universo u otro, podía tener distintos significados. Por ejemplo, de acuerdo con el postulado de las paralelas, por un punto exterior a una recta es posible trazar una paralela y sólo una. Podemos leer ese postulado entendiendo por recta una ecuación lineal en dos variables; por punto, un par de números; por punto exterior a una recta, que las coordenadas del punto, al ser substituidas en la ecuación de la recta, no la satisfacen; finalmente, dos rectas son paralelas, si el sistema de ecuaciones que forman carece de solución común. Con esta interpretación, el postulado de las paralelas es cierto, si trabajamos con números reales. Pero, ¿qué ocurriría si por recta hubiésemos considerado las ecuaciones de circunferencias del espacio de tres dimensiones, todas ellas del mismo centro y radio?

En 1936, en un trabajo acerca del concepto de verdad en matemática, Tarski introdujo la primera definición de interpretación de un lenguaje formal y de sus frases, en un universo concreto de objetos. La idea de Tarski, una vez formulada con precisión, es simple. Todo consiste en dar una interpretación exacta de los signos del lenguaje, propios de la teoría, y una interpretación estándar de los signos lógicos y los cuantificadores; las variables se referirán a objetos de un cierto conjunto —el dominio de la interpretación— y los signos propios de la teoría se traducirán en relaciones entre objetos del dominio. Así, las expresiones formales pasan a ser ex-

LOS AXIOMAS DE LA TEORIA ZERMELO-FRAENKEL DE CONJUNTOS

Axioma de extensionalidad:

$$\forall X \forall Y[X=Y \leftrightarrow \forall t(t\in X \leftrightarrow t\in Y)]$$

Dos conjuntos X e Y son iguales si, y sólo si, tienen los mismos elementos.

Axioma del par desordenado:

$$\forall x \forall y \exists z[\forall t(t\in z \leftrightarrow t=x \vee t=y)]$$

Dados dos conjuntos x e y, existe un tercer conjunto z cuyos elementos son exactamente los conjuntos x e y.

El nuevo conjunto z se designa, brevemente, $\{x,y\}$; es decir, $z=\{x,y\}$.

Axioma de la unión:

$$\forall X \exists Y[\forall t(t\in Y \leftrightarrow \exists x\in X t\in x)]$$

Dado un conjunto X, existe otro conjunto Y cuyos elementos se obtienen juntando en un solo conjunto todos los elementos de todos los elementos del conjunto X.

El nuevo conjunto Y se designa brevemente $Y=\cup X=\cup\{x{:}x\in X\}$.

Axioma de las partes:

$$\forall X \exists Y[\forall t(t\in Y \leftrightarrow t\subseteq X)]$$

Dado un conjunto X, existe otro conjunto Y cuyos elementos son precisamente los subconjuntos de X.

El nuevo conjunto Y se designa brevemente $Y=\mathcal{P}(X)$.

Axioma del infinito:

$$\exists X[0\in X \wedge \forall x(x\in X \rightarrow x\cup\{x\}\in X)\}$$

Existe un conjunto infinito, por lo menos.

Esto significa que existe un conjunto que contiene un objeto –generalmente se elige el conjunto vacío 0– y, con cada uno de los objetos x que contiene, también contiene el siguiente de x, $sg(x)=x\cup\{x\}$.

El menor de todos los conjuntos infinitos se representa por medio del símbolo $\mathbb{N}$ [o, también, por medio del símbolo ω] y se conoce como el conjunto de los número naturales.

Axioma de reemplazamiento:

$$\forall x \forall y \forall y'[\alpha(x,y)\wedge\alpha(x,y') \rightarrow y=y'] \rightarrow \forall X \exists Y[\forall t(t\in Y \leftrightarrow \exists x\in X \alpha(x,t))]$$

Dada una función f y un conjunto X, la imagen de X por la función f es asimismo un conjunto.

Es decir, $Y=f(X)=\{f(x){:}x\in X\}$ es un conjunto.

Axioma de regularidad:

$$\forall X[X\neq 0 \rightarrow \exists x\in X(x\cap X=\emptyset)]$$

Todo conjunto tiene rango [o, equivalentemente, todo conjunto no vacío tiene elementos $\in$ -minimales].

Los axiomas precedentes constituyen la teoría Zermelo-Fraenkel de conjuntos. A ellos se añaden, cuando son necesarios, los dos axiomas siguientes:

Axioma de la elección:

$$\forall X[\emptyset\notin X \rightarrow \exists f{:}X\rightarrow \cup X \text{ tal que } \forall x\in X(f(x)\in x)]$$

Dada una colección de conjuntos no vacíos, existe una función de elección.

Hipótesis general del continuo:

$$\forall X \forall Z[X\leqslant Z\leqslant \mathcal{P}(X) \rightarrow X\sim Z \vee Z\sim\mathcal{P}(X)]$$

Todo conjunto Z, comprendido entre un conjunto X y el conjunto de sus partes $\mathcal{P}(X)$, es equipotente a uno de los dos.

presiones que hablan de los objetos de ciertos conjuntos y, en ellos, si conocemos las propiedades de que gozan los objetos de dichos conjuntos, serán ciertas o falsas.

Aparece, pues, el concepto de modelo de una teoría formal. Un conjunto, junto con una interpretación de los signos del lenguaje formal, que haga válidos todos los teoremas de una teoría es un modelo de la teoría. (El ejemplo anterior constituye un modelo de la geometría de Euclides plana.) Cuando una teoría admite un modelo es consistente: es decir, carece de contradicción, o lo que es lo mismo, no es posible demostrar un teorema formal y su negación.

La clase de conjuntos bien fundados —los conjuntos con rango— constituye un modelo de la teoría formal ZF. Modelo que posee, sin embargo, una limitación: no es un conjunto. Pero, ¿existe algún conjunto que sea modelo de la teoría ZF? La respuesta nos la darían Tarski y Sierpinski, introduciendo los cardinales inaccesibles. Si consideramos el conjunto de todos los conjuntos que tienen rango menor que un número cardinal inaccesible dado, obtendremos un modelo de la teoría de conjuntos ZF y este modelo será, además, un conjunto.

Los cardinales inaccesibles son cardinales que no se pueden alcanzar ni con sumas de cardinales menores que ellos, si la cantidad de sumandos también es menor, ni mediante producto de cardinales menores que ellos, si la cantidad de factores es asimismo menor. Ahora bien, ¿existen cardinales inaccesibles? ¿Podemos establecer en el seno de la teoría ZF + AC un teorema que diga "existen cardinales inaccesibles"? La pregunta recibe una respuesta negativa, ya que, si fuera posible demostrar el citado teorema, cabría demostrar la consistencia de una teoría formal en el seno de la propia teoría formal, lo que viene vedado por el segundo teorema de incompletitud de Gödel.

Si queremos que existan cardinales inaccesibles habrá que imponerlos mediante un nuevo axioma. Tarski daría una axiomática de la teoría de conjuntos en la que quedaría garantizada la existencia de cardinales inaccesibles, imponiendo un axioma de inaccesibilidad que, además, implicaría el AC. Con esa axiomática la consistencia de la teoría ZF + AC admitiría demostración.

Si se prescinde de AC, podemos introducir dos tipos de infinitud: la nofinitud de Bolzano-Cantor y la infinitud de Bolzano-Dedekind. Aunque en 1918 Sierpinski abordó la noción

de infinitud y su relación con el AC, todas las definiciones que manejó eran equivalentes a una de las dos anteriores expuestas. En 1924 Tarski, por su parte, dice aportar una definición completamente nueva de conjunto finito, pero en realidad es la misma que la de Bolzano-Cantor.

En ese mismo trabajo Tarski da seis definiciones distintas, cada una de las cuales implica la siguiente si no introducimos el AC, pero entonces no son equivalentes entre sí; para la equivalencia precisaba del AC. Se planteaba él una cuestión a la que era preciso dar respuesta: ¿podemos establecer la equivalencia de todas las definiciones posibles de infinitud con axiomas más débiles que el AC? ¿Implican algunas de esas equivalencias necesariamente el AC?

Tarski mismo respondería en 1938 a esa cuestión estableciendo que la equivalencia de cualquiera de tres nuevas definiciones de finitud con la definición de Bolzano-Cantor implicaba el AC. Fue más lejos. Introdujo una definición de finitud cuya equivalencia con la de Cantor implicaba la hipótesis general del continuo.

Así mostraba Tarski que renunciar al AC provocaría una confusión enorme en el concepto de finitud. Por el contrario, aceptando el axioma, sólo existiría un concepto de finitud y, consiguientemente, de infinitud, con lo cual la teoría de conjuntos dispondría de una definición única de este demonio del pensamiento, que, durante tantos siglos, había vagado por el mundo: el infinito.

Si bien es cierto que las aportaciones de Tarski a la teoría de conjuntos no alcanzan el interés de sus aportaciones en otros campos de la lógica (teoría de modelos, algebraización de la lógica, decidibilidad e indecidibilidad de teorías matemáticas), es clara su contribución: esclarecer las consecuencias del AC y las consecuencias que, en el propio seno de la teoría de conjuntos, supondría renunciar al preciado postulado. Además, con la introducción de los cardinales inaccesibles, Tarski abría una senda hacia los grandes cardinales que tantos resultados han aportado a la teoría de conjuntos en los últimos años.

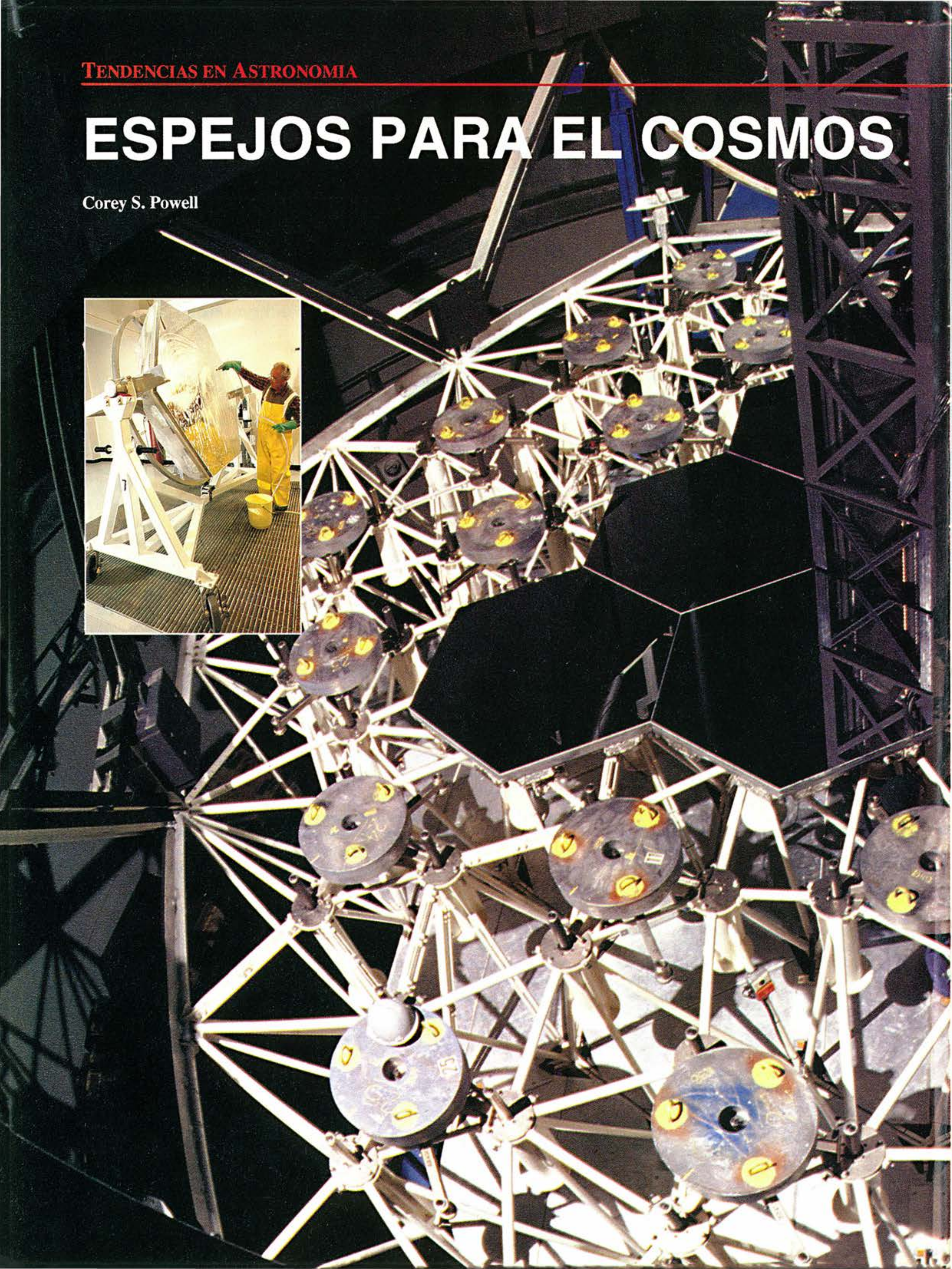
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

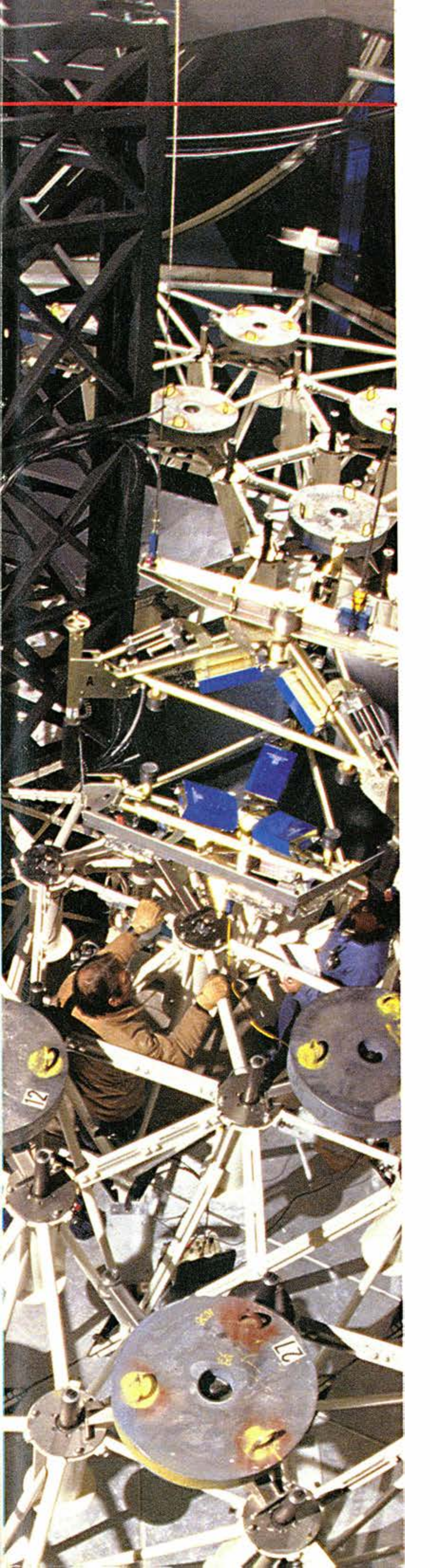
ALFRED TARSKI. COLLECTED PAPERS. S. Givant y R. N. MacKenzie. Birkhäuser; Basilea. 1981.

ALFRED TARSKI I LA TEORIA DE CONJUNTS. J. Pla en *Theoria*, vol.11, págs. 343-417; 1988-1989.

ESPEJOS PARA EL COSMOS

Corey S. Powell





Una nueva generación de telescopios, dotados de enormes espejos colectores de luz, y una ingeniosa tecnología óptica prometen dar un paso gigantesco en la posibilidad de explorar el universo.

Los ingenieros que trabajaban en el interior de la cúpula del telescopio Keck el 8 de agosto apenas se habían enterado de que el huracán Fefa se dirigía hacia Mauna Kea, en cuya cima, a 4200 metros, se alza el instrumento. Su atención se concentraba en un espejo hexagonal que se hacía descender con sumo cuidado para colocarlo en su posición final, en alineación precisa con otros nueve espejos segmentados, ya ubicados.

Aunque nadie aplaudió, ese décimo espejo representaba un hito: el telescopio Keck acababa de superar el área colectora de luz del famoso telescopio Hale del Monte Palomar, en California. Cuando se inserte el trigésimo sexto y último segmento a principios de 1992, el espejo completo de Keck tendrá un diámetro de diez metros, por lo que será, con ventaja, el mayor telescopio del mundo.

El Keck es sólo el primero de una familia de monstruos ópticos basados en diseños de espejos radicalmente nuevos, que dejarán empequeñecido al venerable Hale. Los astrónomos han elaborado una sucesión de instrumentos cada vez más grandes desde que Galileo apuntó su primitivo anteojo al cielo en 1609, pero el Hale parecía señalar el pináculo de la ingeniería de telescopios cuando se terminó en 1947. Su espejo de cinco metros pesaba 20 toneladas y necesitó enfriarse durante más de un año antes de ser pulido, operación que quedó interrumpida por la segunda guerra mundial y tardó once años en completarse.

La propia magnitud de la tarea levantó dudas sobre la idea de construir instrumentos mayores que el Hale. Duplicar las dimensiones de ese espejo multiplicaría por ocho su peso y, por tanto, lo expondría al pandeo. La montura del telescopio y la cúpula del observatorio tendrían también que ser mucho mayores, más complicadas y por consiguiente muy costosas. Además, la turbulencia atmosférica en el lugar del observatorio y por encima del mismo puede anular la mejor resolución que en teoría debería corresponder a un telescopio mayor.

Pese a ello, los astrónomos siguen formulando preguntas cada vez más provocadoras que sólo pueden responderse forzando la tecnología de los telescopios. Tienen hambre de luz más intensa que les permita estudiar objetos lejanos y tenues, tal vez poseedores de las claves de misterios tan

1. LOS SEGMENTOS DEL ESPEJO del telescopio Keck se anclan a una estructura de soporte motorizada y se alinean entre sí con precisión de una diezmillonésima de metro. El cupo total de 36 espejos convertirá al Keck en el mayor telescopio óptico del mundo.





2. EL TELESCOPIO KECK adopta un modelo de espejo segmentado propuesto por el director del proyecto, Jerry Nelson (*izquierda*). En 1987, los operarios comenzaron a montar la cúpula del telescopio, y dos años más tarde instalaron la estructura del mismo; en octubre de 1990, se colocaron

grandes como el origen (y destino final) del universo, o capaces de revelar cómo se formaron las galaxias semejantes a nuestra Vía Láctea. Algunos de los más fascinantes objetos en el cosmos —desde cuásares de alta energía y galaxias destrozadas hasta estrellas en proceso de nacimiento y posibles planetas alrededor de alejados soles— siguen siendo enigmáticos simplemente porque no pueden observarse con suficiente claridad. En palabras de John Kormendy, del Observatorio Astrofísico del Dominio en Columbia Británica, "la ciencia avanza muy deprisa cuando mejora la observación".

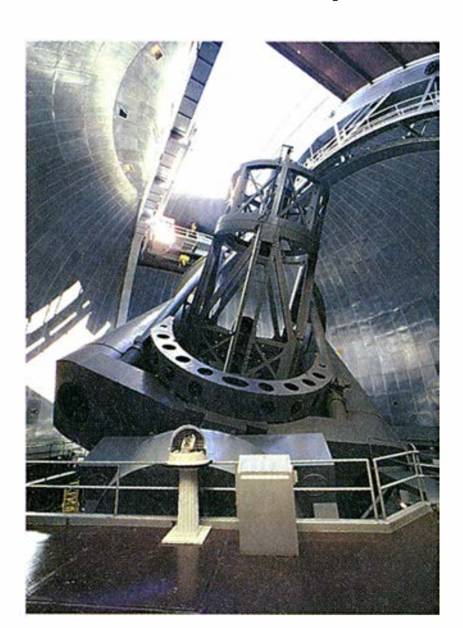
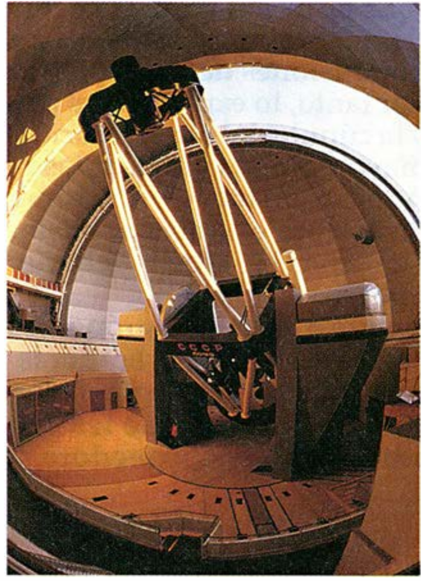
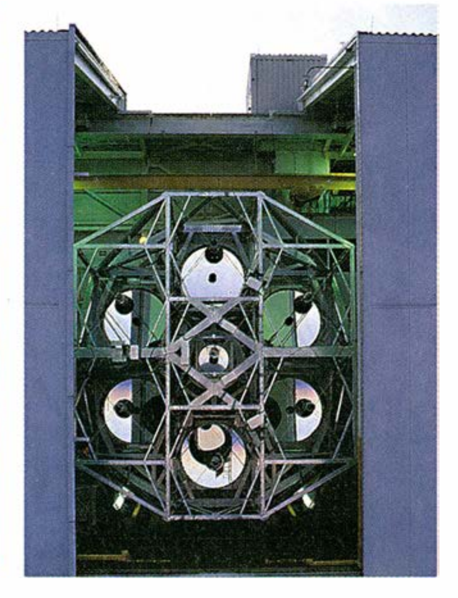
Una manera obvia de obtener una visión más clara del cosmos es colocar un telescopio en el espacio, por encima de la entenebrecedora atmósfera terrestre. Sin embargo, el Telescopio Espacial Hubble, ya en órbita, no ha satisfecho las expectativas en él puestas, y por otra parte los constructores de telescopios han descubierto en los últimos años maneras de superar muchas de las limitaciones de los anteriores instrumentos instalados en el suelo.

Los recientes e importantes adelantos en las técnicas de moldeo permiten a los ópticos fabricar espejos enormes, relativamente ligeros y económicos. Al mismo tiempo, los avances en la tecnología del pulido hacen posible dar a esos espejos curvaturas muy grandes, con superficies casi en forma de tazón que reflejan la luz hacia un foco muy próximo al espejo. Tales espejos, denominados rápidos, tienen la gran ventaja de que puedan construirse telescopios extremadamente cortos y unas estructuras de observatorio mucho más pequeñas (y por lo tanto menos costosas y más estables).

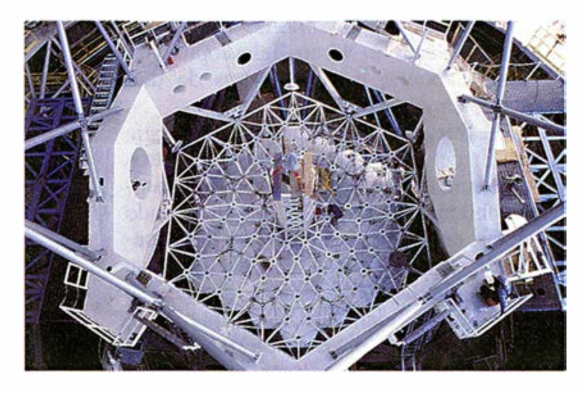
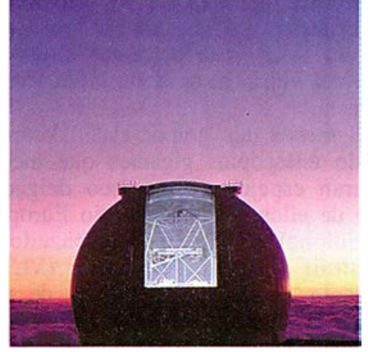
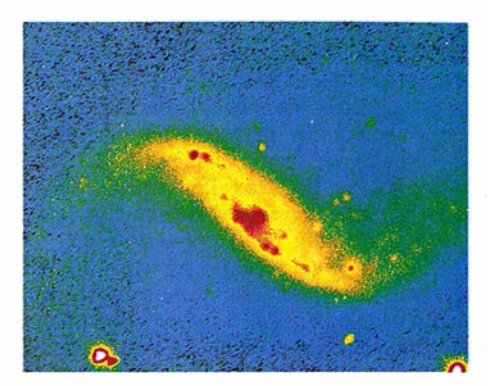
La óptica adaptativa promete imágenes de claridad sin precedentes, incluso con telescopios de tamaño modesto (de uno a cuatro metros). En esta manera de operar, un espejo corrector controlado por ordenador deforma con precisión su superficie de tal modo que compense la distorsión causada por la turbulenta atmósfera. "La astronomía sobre el suelo terrestre se parece cada vez más a la astronomía espacial", declara Alan N. Stockton, del Instituto de Astronomía de la Universidad de Hawai. "Hay sistemas muy complejos en los que si algo no funciona a la perfección falla el telescopio entero."

Jerry E. Nelson, de la Universidad de California en Berkeley, científico jefe del proyecto del telescopio Keck, comprendió que una manera de salvar las dificultades de fundir y pulir un enorme espejo único era componerlo a partir de otros pequeños. La superficie del telescopio Keck llegará finalmente a igualar la de un espejo único de 10 metros. Es fácil ver las ventajas de los espejos segmentados: los espejos del Keck tienen solamente 7,5 centímetros de espesor, y cada uno de ellos es suficientemente pequeño para mantenerse rígido, sin pandearse.

Al elegir el diseño de espejo segmentado, Nelson afrontaba algunos de-

3. LA FORMA DE LOS TELESCOPIOS OPTICOS ha evolucionado muy lentamente. El Telescopio Hale (*izquierda*), que constituyó un hito, se terminó en 1947. Fue superado en 1976 por el telescopio soviético de seis metros (*centro*), de montaje inteligente y simplificado, pero que ha resultado en lo demás decepcionante. En 1979, el Telescopio de Espejo Múltiple (*derecha*) rompió con la tradición al emplear varios espejos para formar una imagen única, abriendo así el camino para el diseño de espejo segmentado del Keck.

los primeros segmentos del espejo. Una serie de imágenes de prueba, obtenidas a finales de 1990, entre ellas la vista de la galaxia espiral NGC 1232 (*derecha*) demostraron que el complicado sistema de orientación de los espejos del Keck funciona según lo esperado.

licados retos técnicos. Cada espejo del Keck es sólo un elemento de la superficie reflectora total, por lo que debe pulirse para adquirir una forma compleja, muy específica. Al cabo de bastantes pruebas, el grupo de Nelson descubrió que se podía obtener la curvatura deseada doblando cada segmento precisamente de la manera adecuada durante el proceso de pulido y dejándolo luego recuperarse, con lo cual adquiriría la forma deseada.

Los 36 espejos del telescopio Keck deben además conservar su alineación precisa cuando el telescopio gira y cuando la temperatura varía. Una complicada red de sensores de presión situados detrás de cada segmento especular detecta la posición exacta de éste y transmite la correspondiente información a un ordenador central. Dos veces por segundo, el ordenador envía órdenes a un conjunto de actuadores motorizados que mantienen la posición correcta de los referidos segmentos.

Muchos científicos e ingenieros dudaron del buen resultado de este procedimiento. En su primer uso práctico, en diciembre de 1990, con sólo nueve segmentos colocados, el telescopio Keck despejó tales dudas al obtener una serie de imágenes de prueba notablemente claras de galaxias próximas, impresionando además a la Fundación W. M. Keck, que había aportado 70 millones de los 94,2 millones de dólares que cuesta el telescopio. El pasado abril, esta Fundación, administradora de la fortuna de William M. Keck, fundador de la Superior Oil Company, anunció que donaría hasta 74,6 millones para la construcción de un segundo telescopio idéntico (Keck II) a corta distancia del primero. La terminación de Keck II se ha programado para 1996.

Pese a la calidad de sus primeras imágenes, la importancia del telescopio Keck para la astronomía estribará más en su capacidad de recoger la luz que en su resolución fina. Lennox L. Cowie, cosmólogo del Instituto de Astronomía, describe familiarmente el instrumento como un "balde de luz", un colector gigante de fotones procedentes de objetos de luz extremadamente tenue, cualidad ideal para la espectroscopía, donde se requiere más luz que para la formación de imágenes. La espectroscopía es una de las más poderosas herramientas de la astronomía, porque revela datos sobre la composición, el movimiento y el estado físico de cuerpos cósmicos distantes. De hecho, cuando el Keck inicie su trabajo científico el año próximo, dos de los tres detectores conectados a él serán espectrómetros.

El innovador diseño de espejo segmentado del telescopio Keck no significa, sin embargo, el fin de los grandes espejos únicos. El Keck se inspiró en la construcción y funcionamiento del Telescopio de espejos múltiples (MMT) del Observatorio Steward, en Arizona, que consta de seis espejos de 1,8 metros, equivalentes en superficie a la de un solo colector luminoso de 4,5 metros. Por ironía de las cosas, mientras el Keck demuestra la validez del concepto de espejos múltiples, en Steward se preparan planes para sustituir los seis reflectores del MMT por un solo gran espejo que utiliza una técnica igualmente radical.

Según Frederic H. Chaffee, Jr., director del MMT, la proliferación de telescopios muy grandes señalaba que una superficie colectora de 4,5 metros "no sería terriblemente competitiva hacia finales de siglo". Por otra parte, las restricciones financieras no permitirían la construcción de un telescopio enteramente nuevo, y en vista de ello Chaffee se dirigió a J. Roger P. Angel, su vecino del laboratorio de espejos del Observatorio Steward de la Universidad de Arizona, en demanda de un espejo mayor.

Alternativas compactas

Los espejos de Angel se construyen mediante una nueva técnica llamada moldeado rotatorio. En el pasado, los ópticos creaban grandes discos planos de vidrio y después los pulían hasta darles la forma apropiada. En Steward, el vidrio fundido se vierte en un molde circular dentro de un gran horno rotatorio, en el cual la fuerza centrífuga mantiene curvada la superficie a medida que el espejo se enfría. Aun cuando la curvatura resultante no sea precisamente la correcta para un telescopio reflector, el moldeado rotatorio reduce espectacularmente el trabajo de pulido a realizar. Las innovadoras máquinas pulidoras de Steward, controladas por ordenador, crean después la superficie de acusada pendiente necesaria para un espejo extremadamente rápido.

Los espejos construidos en Steward adoptan una estructura en panal de abeja con el fin de aligerar su peso conservando su rigidez. En esencia, consisten en una delgada lámina de vidrio curvado asentada sobre una base de vidrio ligera y en panal. Los ingenieros usaron artificios similares cuando moldearon el espejo de cinco metros del telescopio Hale, pero Angel ha avanzado la técnica mucho más, de modo que sus espejos contienen unas tres cuartas partes de aire.

Aunque el moldeado rotatorio ha recibido bastante publicidad, algunos científicos e ingenieros vinculados a otros proyectos se quejan de que todavía no se ha probado en espejos extremadamente grandes. Corre el rumor persistente de que el moldeado en panal de abeja crea una especie de "patrón acolchado" sobre la superficie del espejo que no desaparece con el pulido. Cuando le plantean tales problemas, Angel suele responder con una carcajada.

Hasta ahora, Steward ha producido espejos en panal de hasta 3,5 metros de diámetro. Este mismo mes Angel construirá el primero de los espejos muy grandes del laboratorio, un disco de 6,5 metros para el MMT. A continuación, el laboratorio comenzará a trabajar en una serie de espejos de ocho metros para ciertos proyectos de telescopios gigantes, todavía en el ta-

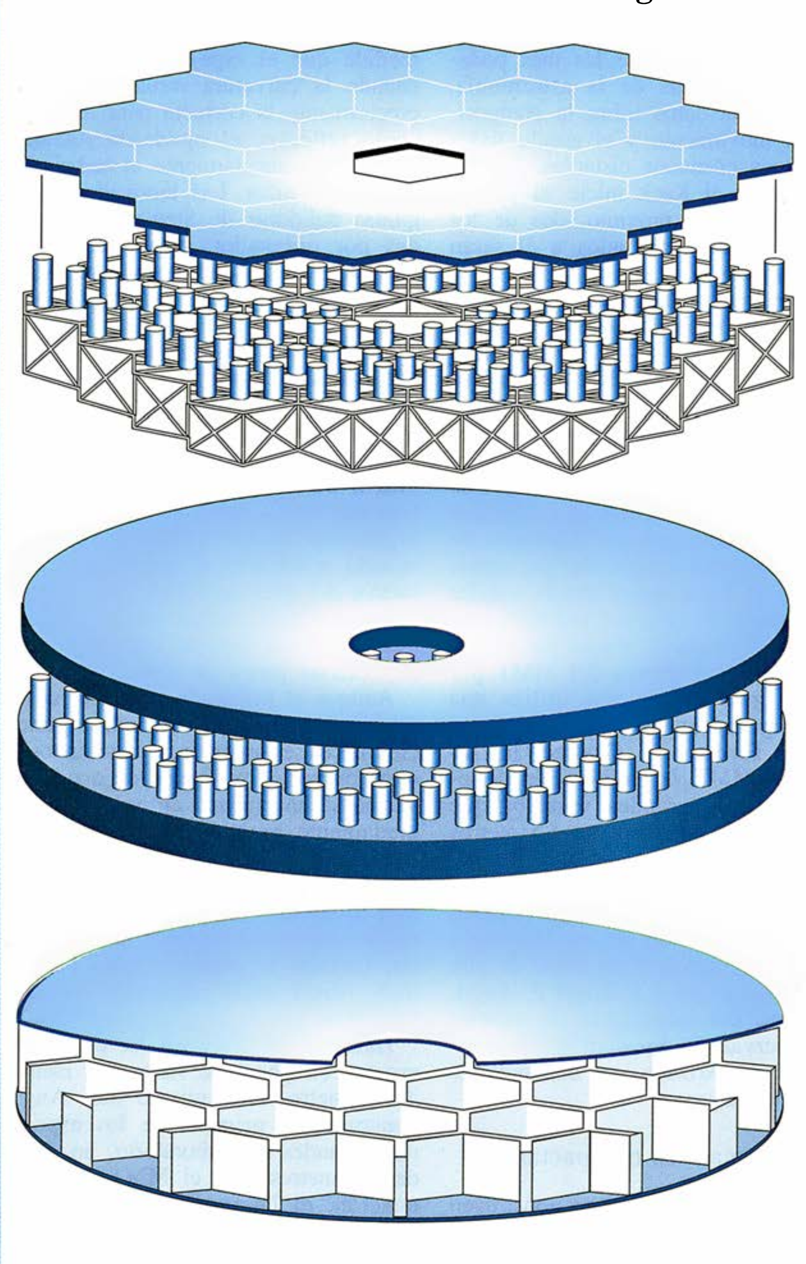
blero de dibujo. Dependiendo de cómo se desarrolle la carrera de la tecnología de los telescopios, los reflectores de ocho metros pueden ser, durante un corto tiempo, los mayores del mundo con espejos de una sola pieza.

De no ser así, los laureles de la victoria puede llevárselos Schott Glassworks o Corning Glass, firmas de óptica que persiguen un tercer tipo importante de diseño de espejo, el de menisco delgado o de espesor constante. Como en los espejos de Angel, el moldeado será rotatorio, pero estos espejos no se apoyarán en un panal, demasiado frágiles por consiguiente para mantener su forma correcta sin ayuda mecánica. En este caso, se valdrán de actuadores controlados por ordenador semejantes a los que alinean los espejos del Keck, para deformar la superficie del vidrio hasta darle la curvatura correcta.

Al menos dos grupos están desarrollando telescopios gigantes que incorporarán espejos de menisco delgado. Uno de ellos, el Observatorio Europeo Meridional (ESO), ha comenzado a construir el Gran Telescopio (VLT), conjunto de cuatro telescopios de 8,2 metros de diámetro y ocho de un metro, que costará 225 millones de dólares y se instalará en Cerro Paranal en Chile. Cada uno de los espejos de 8,2 metros tendrá apenas 17,5 centímetros de grueso. El gobierno japonés ha comprometido 300 millones de dólares para construir el Gran Telescopio Nacional Japonés, de 7,5 metros de diámetro, en el Mauna Kea.

El Telescopio de Nueva Tecnología (NTT) del ESO, aparato de 3,6 metros de diámetro instalado en el Observatorio chileno de La Silla, ha justificado ya las esperanzas puestas en los espejos de menisco delgado. En efecto, su espejo de 24 centímetros de grueso tiene flexibilidad suficiente para que los ingenieros puedan alterar ligeramente su forma mediante una red de 75 controladores motorizados. Cuando el telescopio inició su funcionamiento en 1989, el espejo sufría una deformación similar a la que todavía aqueja al

Nuevos modos de recoger la luz de las estrellas



ESPEJOS SEGMENTADOS: Incorporan muchos espejos pequeños y delgados, más fáciles de construir y sustentar que un solo espejo grande. Unos controladores motorizados mantienen estos espejos alineados de manera que den una imagen única.

- *Telescopios Keck I y Keck II*, equivalentes a telescopios de 10 metros (Instituto de Tecnología de California, Universidad de California y Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio)
- *Telescopio de Exploración Espectroscópica*, equivalente a 8 metros (Universidad estatal de Pennsylvania, Universidad de Texas)
- *Gran Telescopio Alemán* (propuesto), equivalente a 12 metros (gobierno alemán)

ESPEJOS DE MENISCO: Son de una pieza, aunque demasiado delgados para soportar su propio peso. Se ajustan mediante actuadores mecánicos que les dan en todo momento la forma correcta.

- *Gran Telescopio*, cuatro espejos de 8,2 metros (Observatorio Europeo Meridional)
- *Gran Telescopio Nacional Japonés*, espejo de 7,5 metros (gobierno japonés)

ESPEJOS DE PANAL DE ABEJA: Constan de una delgada superficie receptora que descansa sobre una estructura de vidrio en panal de abeja. Son rígidos, pero muy ligeros porque casi todo su volumen es aire.

- *Conversión del Telescopio de Espejo Múltiple*, espejo de 6,5 metros (Universidad de Arizona)
- *Proyecto Columbus* (propuesto), dos espejos de 8,4 metros (Universidad estatal de Ohio, Universidad de Arizona, gobierno italiano)
- *Proyecto Magallanes* (propuesto), espejo de 8 metros (Institución Carnegie, Universidad Johns Hopkins, Universidad de Arizona)
- *Observatorio Nacional de Astronomía Optica* (propuesto): dos telescopios de 8 metros en puntos separados (gobiernos de los EE.UU., Gran Bretaña y Canadá)

Telescopio Espacial Hubble. Sin embargo, en el caso del NTT, los ingenieros pudieron jugar con los controles para curvar el espejo hasta la forma correcta; el telescopio produce ahora imágenes de soberbia calidad, que a veces logran resoluciones finísimas, de un tercio de segundo de arco. (Un segundo de arco es 1/3600 de un grado; el disco de la luna llena abarca alrededor de medio grado.)

Igual que Nelson y Angel, Massimo Tarenghi, encargado del programa VLT, respira confianza. "Para alcanzar la máxima resolución se necesitan espejos de una pieza. No se trata de menospreciar el Keck, pero un espejo segmentado pierde resolución", sostiene. Tarenghi sueña con que el sistema de control activo del VLT sea también capaz de compensar algunos de los efectos térmicos que perturban a numerosos telescopios. En cambio Angel, cuyos espejos no permiten tales ajustes, como es natural adopta el punto de vista opuesto. "El objetivo de los astrónomos ha sido siempre espejos rígidos. Ahora los ingenieros dicen que un espejo flexible, capaz de deformarse, es bueno. Su lógica se me escapa", dice todo confuso. Pero el progreso más revolucionario en astronomía óptica no reside en los espejos mismos, sino en nuevas maneras de manipular las imágenes que recogen.



4. LOS ESPEJOS EN PANAL DE ABEJA diseñados por Roger Angel, del Laboratorio de Espejos del Laboratorio Steward, ofrecen una manera de construir reflectores grandes y rígidos y, no obstante, relativamente ligeros. Los espejos se moldean en un horno giratorio que da al vidrio en estado de fusión la forma de una superficie curvada, lo que después simplifica el proceso de pulido.

La lucha contra el aire

Todos los telescopios, por bien proyectados y construidos que estén, se enfrentan a un enemigo común: la turbulenta atmósfera terrestre. Incluso en los mejores emplazamientos, la distorsión atmosférica impide observar detalles que abarquen arcos inferiores a un medio segundo, sea cual fuere el tamaño del instrumento. Un buen telescopio concentra en un solo punto todos los rayos de luz procedentes de una estrella distante.

Para fortuna de los poetas y desgracia de los astrónomos, el aire curva la trayectoria de los rayos luminosos, y ésta es la causa de que las estrellas titilen. La turbulencia de la atmósfera actúa como una serie de diminutas lentes colocadas delante del telescopio; se provoca así que una misma estrella se enfoque en muchos puntos simultáneamente, puntos que danzan por los continuos cambios atmosféricos, produciendo una imagen borrosa. En principio, un reflector flexible incorporado en el telescopio podría ser deliberadamente curvado y deformado de manera que compensase los efectos atmosféricos.

La idea anterior, llamada óptica adaptativa, se remonta al menos a 1953, cuando Horace W. Babcock, hoy día en los Observatorios de la Institución Carnegie de Washington, propuso un ingenioso método para superar la borrosidad introducida por la atmósfera. En los últimos años, los progresos en física atmosférica, diseño de espejos y potencia de cálculo han traído la óptica adaptativa hasta el umbral de la realidad. Esta técnica ofrece la esperanza de permitir que los telescopios vean algunos objetos desde el suelo terrestre con la misma cristalina claridad que desde el espacio exterior.

A principios de los ochenta, los astrónomos comenzaron a trabajar en sistemas rudimentarios de óptica adaptativa para corregir el movimiento de imagen, la forma más sencilla de distorsión atmosférica. René Racine, de la Universidad de Montreal, ha desarrollado un sistema de óptica adaptativa acorde con esa idea, denominado cámara de alta resolución, o, como prefieren los astrónomos, HRCam. El aparato incorpora un detector que mide el grado de desviación sufrido por la luz de las estrellas al pasar por la atmósfera, junto con un espejo que se inclina y se ladea para compensar los movimientos y deformaciones más acusados de la imagen.

Hace dos años, Racine instaló la HRCam en el telescopio Franco-Canadiense-Hawaiano de Mauna Kea, de 3,6 metros, para realizar una serie de experimentos ópticos. Las mejoras de resolución resultantes fueron tan espectaculares, que los investigadores de Mauna Kea no tardaron en reclamar la utilización de esta cámara para las observaciones regulares. Otros prototipos —entre los que destaca un sistema infrarrojo de óptica adaptativa desarrollado por el ESO— operan ya en otros lugares, pero HRCam es probablemente el único sistema real de óptica adaptativa que hace trabajo científico habitual. Robert D. McClure, del Observatorio Astrofísico del Dominio, ha empleado el telescopio Franco-Canadiense-Hawaiano para investigar las Cefeidas variables, clase de estrellas que sirven como patrones celestiales porque su período de variación revela su luminosidad absoluta, y por tanto su verdadera distancia. De esta manera, McClure y su colaborador John Tonry, junto con Racine y Michael Pierce, del Observatorio Nacional de Kitt Peak, esperan determinar exactamente la distancia al Cúmulo de Virgo, rico cúmulo de galaxias a distancia entre 50 y 75 millones de años-luz.

Determinar la distancia al Cúmulo de Virgo es uno de los problemas centrales de la actual cosmología, pues conociendo tal distancia los investigadores averiguarán la velocidad de expansión del universo y calcularán así la edad del cosmos. Dos recientes imágenes de prueba tomadas mediante la HRCam muestran las primeras Cefeidas jamás vistas en una galaxia del Cúmulo de Virgo.

La HRCam también demuestra ser una valiosa ayuda para Kormendy en su búsqueda de pruebas de la existencia de agujeros negros en los centros de las galaxias próximas. Según él, la HRCam mejoró la resolución de sus imágenes desde alrededor de 0,7 a 0,4 segundos de arco, lo cual es suficiente para marcar "una gran diferencia" en cuanto a capacidad de detectar la presencia de una masa extremadamente compacta en galaxias alejadas millones de años-luz. Cuatro de las 14 galaxias que examinó, incluida la galaxia de Andrómeda (M31), muestran indicios de alojar agujeros negros de gran masa.

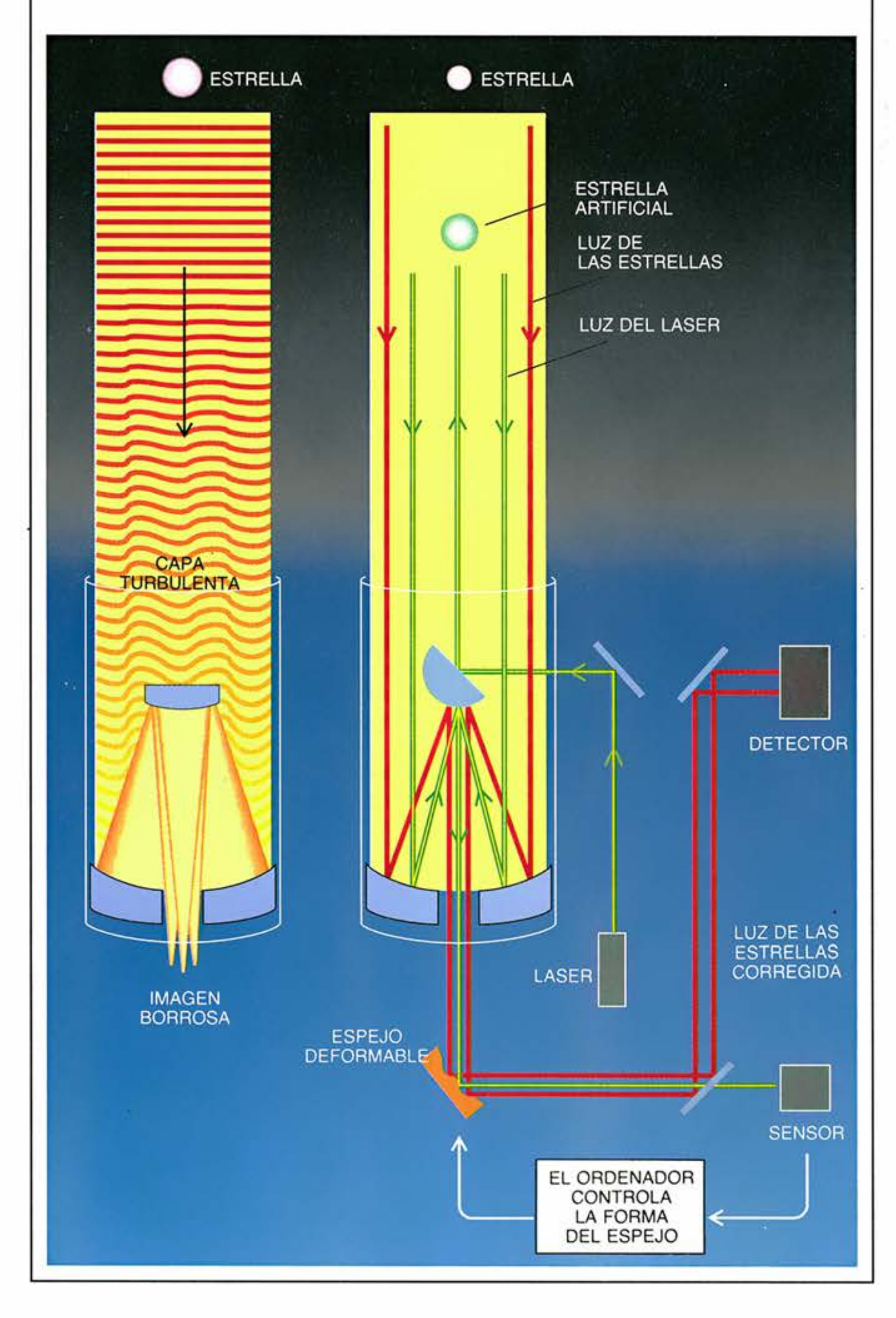
Una limitación de muchos sistemas experimentales de óptica adaptativa es que necesitan ser calibrados con una fuente puntual bastante brillante. Por desgracia, no todos los objetos astro-

Así funciona la óptica adaptativa

En principio, los telescopios grandes pueden formar imágenes más nítidas que los pequeños. En la práctica, sin embargo, la atmósfera terrestre deforma la trayectoria de la luz hacia el suelo (*izquierda*), limitando hasta los mayores telescopios a resoluciones de 0,5 segundos de arco, más de 10 veces el límite teórico. Las imágenes más nítidas no se ciñen a mostrar mayor detalle, sino que facultan al telescopio para detectar objetos más débiles al concentrar la luz en una superficie menor.

Los sistemas de óptica adaptativa pueden anular la borrosidad debida a la atmósfera, permitiendo así a los mayores telescopios desarrollar todo su potencial. Los equipos adaptativos llevan sensores que miden la distorsión atmosférica y un espejo deformable, capaz de curvarse de tal manera que compense la distorsión. Los sensores suelen requerir abundante luz para producir correcciones exactas.

Los sistemas más precisos usarán láseres potentes para proyectar estrellas artificiales en el cielo, muy cerca del blanco. Ello asegurará que se tenga siempre una referencia de brillo suficiente. Cuando el espejo deformable corrige la estrella artificial, también lo hace con el blanco astronómico próximo, tras lo cual un detector capta las imágenes y separa el objeto real del artificial.



nómicos están cerca de una estrella brillante de referencia que convenga; por ello se trabaja para aumentar la sensibilidad de los sistemas de óptica adaptativa; el número de estrellas próximas que podrían servir de guía aumenta espectacularmente al admitirse una luz más tenue como referencia.

Un grupo del Instituto de Astronomía dirigido por François Roddier está trabajando en un sistema no convencional que utiliza sensores colocados por encima y por debajo del punto focal del espejo del telescopio. Estos sensores registran el modo en que la atmósfera ha curvado y deformado la luz incidente. El método tiene la ventaja de necesitar muy poca luz, y por tanto debe dar buen resultado para objetos de brillo bastante tenue. Un programa informático transforma los datos de los sensores en impulsos eléctricos que hacen curvarse y flexionarse un delgado espejo corrector de manera que compense exactamente.

El sistema de Roddier, de escasa complejidad, no trata de compensar toda la distorsión atmosférica, sino sólo la suficiente para que los astrónomos puedan distinguir con claridad los verdaderos centros de las imágenes estelares. Además, probablemente sólo funcionará en longitudes de onda del infrarrojo, donde las imágenes son apreciablemente menos borrosas que con luz visible. En cambio, este sistema es poco costoso y muy compacto. Una chapucera instalación de prueba, montada con lentes sobrantes, un espejo provisional y un ordenador de tosco conexionado podría caber muy bien en una mesa de comedor.

La propia sencillez del diseño de Roddier ha provocado cierto escepticismo. Otros todavía se preguntan hasta qué punto será útil un sistema tan sencillo. Laird Thompson, de la Universidad de Illinois, describe cortésmente el sistema de Roddier como "una etapa de la evolución" en óptica adaptativa, que en breve será sustituida por una técnica más avanzada en la que se utilice una estrella guía generada por láser.

El uso de láseres para crear una estrella artificial destinada a la calibración de un sistema de óptica adaptativa elude el compromiso, de otro modo inevitable, entre sensibilidad y resolución. "Para una clara visión científica, los astrónomos necesitan una estrella brillante próxima al objeto que quieren estudiar", explica Thompson, que ha pasado varios años trabajando en un sistema civil guiado por láser. Una brillante estrella de referencia proporciona luz suficiente para realizar correcciones de imagen cabales. Fue consagrado este concepto el pasado mes de mayo, cuando el Departamento de Defensa de los EE.UU. levantó el

secreto sobre sus diez años de investigación para desarrollar sistemas ópticos adaptativos guiados por láser destinados a la Iniciativa de Defensa Estratégica (SDI). La SDI tenía por objetivo destruir un misil en aproximación mediante un láser de alta potencia. El problema de evitar que el haz láser se disperse antes de alcanzar su blanco entraña muchas de las cuestiones que plantea la corrección de las desviaciones y giros que sufre la luz de una estrella en su camino hasta el suelo. Según considera la SDI, un haz láser rebota al hallar una capa de átomos de sodio a unos 90 kilómetros de altitud en la atmósfera, creando una baliza de referencia cuasipuntual. El sistema de guiado por láser de la SDI puede efectuar correcciones mucho más refinadas que un dispositivo sencillo como la HRCam, pero ello tiene un precio.

Sin embargo, el grueso del trabajo en óptica adaptativa se está realizando ahora en longitudes de onda del infrarojo, donde la distorsión atmosférica es mucho menos pronunciada. Edward Kibblewhite, de la Universidad de Chicago, que apoya los trabajos derivados de la SDI, cree que puede construirse un sistema comercial que opere en el infrarrojo por "algunos centenares de miles de dólares", lo cual es una ganga comparado con el coste de un nuevo telescopio.

Para algunos, no ha llegado todavía el tiempo de la óptica adaptativa guiada por láser. Racine, por ejemplo, considera que "tal como está ahora, el sistema de la SDI no es adecuado para astronomía", porque hay luz dispersada procedente de la estrella artificial. Miembros del grupo de Roddier se quejan de que la óptica adaptativa militar es innecesariamente complicada para el trabajo astronómico. A pesar de ello, las primeras pruebas efectuadas por Robert Q. Fugate en el Campo de Pruebas Opticas Starfire, de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, parecen prometedoras.

Pese a sus enormes posibilidades, la óptica adaptativa presenta limitaciones. El complicado sistema óptico utilizado para corregir la imagen tiende a que se pierda parte de la luz captada por el telescopio. Además, acoplar la óptica adaptativa a los telescopios mayores no será fácil. Los espejos grandes observan una mayor anchura de turbulencia y por consiguiente requieren correcciones más complejas para deslindar la luz estelar. Los espejos muy rápidos de corta distancia focal, hoy en boga, complican el trabajo de detectar distorsiones en la imagen.

Otra restricción es el pequeño campo de visión sobre el cual pueden hacerse las correcciones. Aquí surge un desafortunado compromiso: cuanto mayor sea la resolución, menor será la superficie sobre la cual da resultados la óptica adaptativa. Así, la sencilla HRCam puede producir una imagen corregida que abarca unos dos minutos (120 segundos) de arco, y el sistema de Roddier, que tampoco aspira a la máxima resolución, podría proporcionar correcciones sobre una zona de radio 10 a 20 segundos de arco, según Daniel McKenna, del Instituto de Astronomía. Los sistemas de muy alta resolución derivados de la SDI, sin embargo, sólo serán capaces de producir una imagen clara en luz visible que abarque de cuatro a cinco segundos de arco de anchura.

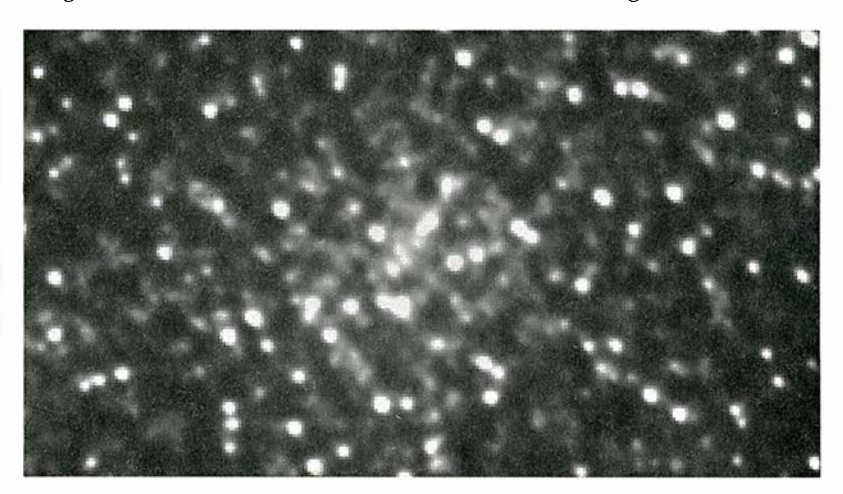
Los telescopios terrestres se atreven con el *Hubble*

Antes de su lanzamiento, en la primavera de 1990, se tenía al *Telescopio Espacial Hubble* por el instrumento que revolucionaría la astronomía. Observador privilegiado por encima de la distorsionante atmósfera terrestre, debía ayudar a resolver las preguntas sobre el origen de las galaxias y la edad del universo.

Pero no funcionó de acuerdo con lo previsto. Además de su problema de enfoque, el telescopio ha sido víctima de cierto número de achaques. La dilatación térmica de los paneles solares ha creado verdaderas angustias, y el fallo de dos giróscopos amenaza con deshacer el sistema de orientación del telescopio. Hace muy poco, una fuente de alimentación del Espectrógrafo de Alta Resolución Goddard, el instrumento menos afectado por los fallos ópticos del *Hubble*, comenzó a hacer travesuras. Ahora, en fin, el impetuoso avance de los instrumentos terrestres está restando todavía más brillo a la misión del *Hubble*.

La más destacada de las virtudes del *Hubble* iba a ser la claridad de sus imágenes; en su funcionamiento correcto, debería resolver detalles de 0,06 segundos de arco. Shrinivas R. Kulkarni observa que los telescopios terrestres equipados con sistemas sencillos de óptica adaptativa sufrirán problemas similares al que aqueja al *Hubble*. Una parte de luz no corregida se mezcla con la imagen, difuminando algunos de los detalles más tenues. El *Hubble* recibirá en 1994 un sistema de lentes correctoras para fijar su enfoque, pero los astrónomos ubicados en la Tierra tendrán que esperar nuevos progresos en la tecnología de la óptica adaptativa. Otra ventaja del *Hubble* es que produce imágenes nítidas en todo su campo de visión.

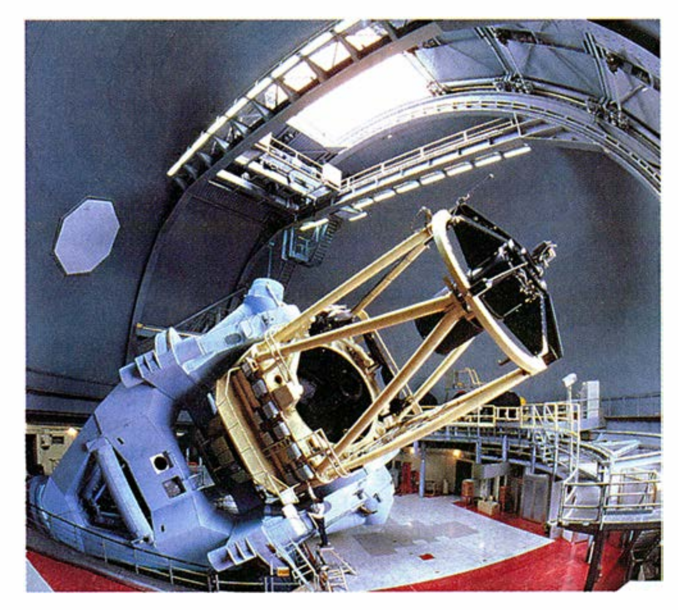
Existen, por último, ciertos inconvenientes de la atmósfera que no se pueden superar ni con óptica adaptativa ni con un diseño refinado de telescopios. Aunque sea transparente para la luz visible, la atmósfera terrestre absorbe fuertemente la mayoría de los rayos ultravioleta; también emite y absorbe ciertas longitudes de onda del infrarrojo. Por ello no hay instrumento cuyas imágenes puedan competir con las obtenidas por el *Hubble* en esas longitudes de onda.

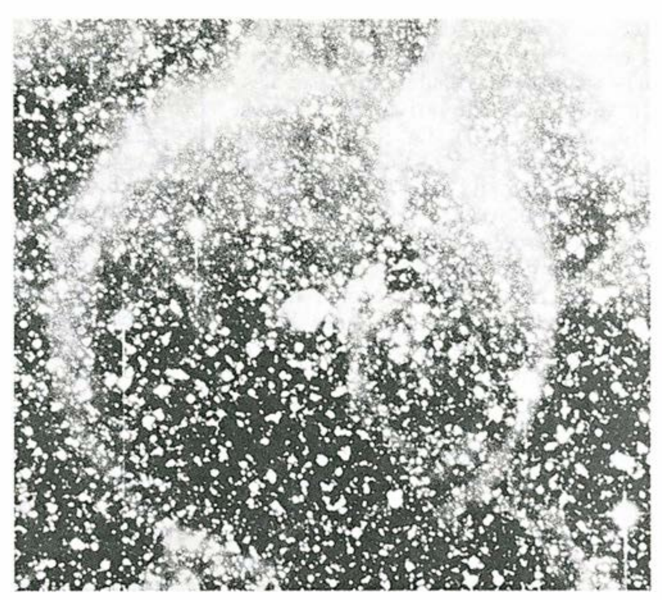


EL *HUBBLE* RESOLVIO las estrellas individuales en la parte central del cúmulo globular M15. Pero los telescopios situados en la Tierra están alcanzando el mismo grado de claridad.

La visión final

Las diferencias son importantes porque muchos objetos de interés (galaxias, estructuras alrededor de los cuásares y nubes de gas donde están naciendo estrellas, por citar sólo algunos) se extienden desde varios segundos hasta muchos minutos de arco. McClure, por ejemplo, observa que





5. TELESCOPIO DE NUEVA TECNOLOGIA en Chile (*izquierda*), que incorpora una soberbia óptica y un espejo primario flexible, de forma ajustable; se apoya en una "cúpula" octogonal especialmente proyectada para reducir la distorsión atmosférica. En su primer año de funcionamiento, el telescopio ha producido imágenes excepcionales, como ésta de la supernova 1987A (*derecha*).

sus estudios del Cúmulo de Virgo no serían posibles usando un sistema guiado por láser y de rígido enfoque. Con toda probabilidad, se utilizarán diversos sistemas de óptica adaptativa según sea el emplazamiento, el telescopio, la clase de observación deseada y la cantidad de dinero disponible.

Si la óptica adaptativa parece un sueño hecho realidad, otra novísima técnica, la interferometría óptica, vendría a ser un manjar de dioses. La óptica adaptativa debería pronto producir imágenes con resolución de una décima de segundo de arco; en cambio, los sistemas experimentales de interferometría pueden ya resolver estrellas separadas por arcos de sólo algunas milésimas de segundo. La interferometría, explotada por los radioastrónomos durante años, implica la combinación de imágenes de dos o más telescopios bastante separados. De este modo, es posible simular el poder resolutivo de un telescopio cuyo tamaño sea la distancia entre los dos instrumentos conectados.

La interferometría requiere que las señales de los telescopios se combinen en fase, esto es, que las ondas de la radiación incidente guarden todas una cuidadosa alineación. Por ser extremadamente corta la longitud de onda de la luz, la interferometría óptica exige que las posiciones de los diversos telescopios y la forma de los frentes de onda se mantengan altamente estables. (Comparemos, por ejemplo, la luz verde, cuya longitud de onda es de unos 0,5 micrometros, o millonésimas de metro, con las ondas radioeléctricas que tienen longitudes de milímetros a metros.) Como ocurre con la óptica adaptativa, la interferometría óptica ofrece un reto especial para los grandes telescopios porque éstos observan a través de regiones amplias y variables de la atmósfera, lo que hace sumamente difícil mantener en fase las ondas de luz que inciden sobre diferentes partes del espejo.

Pese a tales dificultades, en el Observatorio del Monte Wilson, la Universidad de Wyoming en Laramie, la de Cambridge y en varios otros lugares hay grupos que trabajan en el desarrollo de prototipos de sistemas de interferometría óptica. Por ahora, la mayoría de esos sistemas utilizan telescopios pequeños; el sistema de Cambridge, por ejemplo, consta de cuatro telescopios de 50 centímetros separados a 100 metros de distancia. Una técnica emparentada con ésta, en la que trabaja Gerry Neugebauer, del Telescopio Hale, se basa en la colocación de una máscara sobre el gran espejo del Hale. Los agujeros practicados en esa máscara simulan telescopios individuales, pequeños, y muy próximos entre sí.

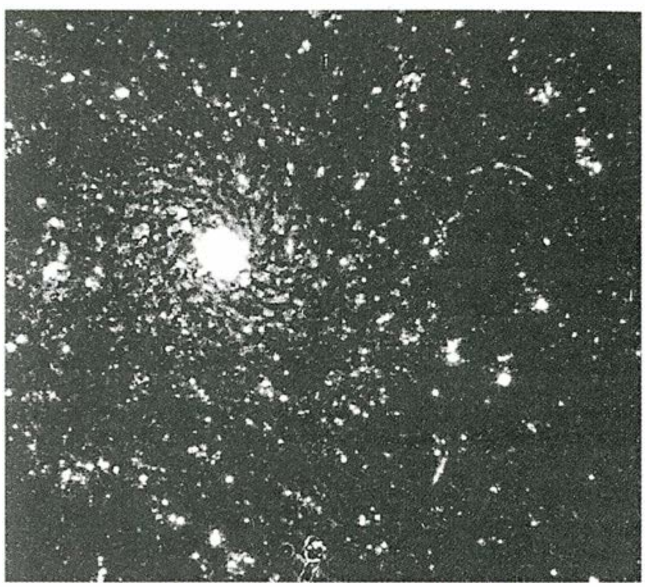
Los telescopios pequeños pueden recoger sólo modestas cantidades de luz, con lo que en sus comienzos la interferometría se limitará a objetos de cierto brillo. Sin embargo, tiene un carácter positivo, el que muchos detalles finos y seductores que encantarían a los astrónomos —por ejemplo, los rasgos de la superficie de las estrellas próximas— se produzcan en objetos de relativa brillantez. El grupo de Neugebauer y otro de Cambridge que trabaja con el telescopio William Herschel del Teide, han logrado producir toscos mapas de las superficies de estrellas gigantes rojas.

Además, tal vez no esté muy lejos la interferometría óptica con telescopios grandes. Cuando la Fundación Keck anunció la proyectada construcción del Keck II a 85 metros del Keck I, uno de sus objetivos declarados era la interferometría óptica. Nelson se propone comenzar con un sistema sencillo de óptica adaptativa que consiga imágenes del Keck con estabilidad suficiente para permitir la interferometría. Con el tiempo, espera pasar a un sistema más elaborado guiado por láser, y añadir un conjunto de cuatro telescopios auxiliares.

Los planes del Gran Telescopio (VLT) del ESO incluyen un programa de interferometría todavía más ambicioso. El grupo de ocho telescopios de un metro y los cuatro monstruos de 8,2 metros se combinarán finalmente para formar una red interferométrica de 190 metros de anchura. Jacques M. Beckers, que dirige el programa de interferometría del VLT, predice resultados maravillosos con este sistema: resoluciones de dos milésimas de segundo de arco en un campo de visión de ocho segundos de arco (zona extraordinariamente ancha en interferometría). "Los astrónomos podrán construir imágenes de la estrella Antares y contemplar el disco que rodea Beta Pictoris", dice, en términos que podrían sonar a desvarío.

Beckers cree que el VLT producirá sus primeros resultados interferométricos en 1997, objetivo bastante ambicioso dado que el primero de los instrumentos de 8,2 metros de la red no quedará terminado hasta 1996. Nelson proyecta un calendario similar para el sistema Keck I-Keck II. No obstante, la mayoría de los astrónomos coinciden con Stockton cuando dice: "Tengo





6. EL TELESCOPIO FRANCO-CANADIENSE-HAWAIANO de Mauna Kea (*izquierda*) ha servido de banco de pruebas para un sistema prototipo de óptica adaptativa. El telescopio puede captar imágenes de estrellas variables individuales en galaxias del Cúmulo de Virgo (*derecha*), proyecto que estaba destinado al malogrado telescopio espacial. El estudio de estas estrellas ayudará a establecer el verdadero tamaño y edad del universo.

la impresión de que la interferometría óptica no podrá realmente utilizarse antes de 10 a 15 años." Peter J. Warner, miembro del grupo de interferometría de Cambridge, cuestiona la sensatez de intentar la interferometría con un telescopio grande tan a principios del juego. Una manera de reducir la dificultad tanto de la óptica adaptativa como de la interferometría es usar mayores longitudes de onda. En frase de Angel, "el infrarrojo no se entera de las pequeñas arrugas de la atmósfera", a diferencia de la luz visible.

Más allá de la luz

La visión tiende a ser mejor en el infrarrojo y, por tanto, los sistemas de óptica adaptativa son mucho más fáciles de construir para esas longitudes de onda más grandes. "No hay duda de que pueden instalarse sistemas de óptica adaptativa en telescopios grandes, de ocho a diez metros, a longitudes de onda del infrarrojo", asegura Thompson, "pero no está claro cuánto tiempo se tardará en hacerlo en el espectro visible, ni si habrá alguien que lo intente". Las imágenes infrarrojas tomadas con algunos telescopios de tamaño medio, tales como el MMT, se están ya acercando al límite teórico de resolución del instrumento, incluso sin óptica adaptativa.

Las observaciones en el espectro infrarrojo son también de gran interés porque ofrecen una ventana para ver objetos astronómicos sutiles y relativamente fríos, tales como planetas, enanas marrones y estrellas recién nacidas y envueltas en polvo. La expansión del universo alarga y atenúa enormemente la radiación de las galaxias y los cuásares distantes. En razón de ello, emisiones iniciales de luz visible llegan a la Tierra en forma de rayos infrarrojos de mayor longitud de onda. "El infrarrojo próximo es la región obvia para hacer cosmología", comenta Cowie, quien recientemente descubrió una misteriosa clase de débiles galaxias cuyo brillo destaca con máxima intensidad en esas longitudes de onda.

Crece sin parar la tendencia a llevar la astronomía óptica al campo de los infrarrojos. Los telescopios ópticos pueden observar en el dominio del infrarrojo próximo con pocas modificaciones, y se están construyendo equipos de la nueva generación con miras a observaciones en el infrarrojo con tecnología de estado sólido. Los detectores de infrarrojos de alta resolución, denominados redes de infrarrojos, permiten ahora obtener imágenes más detalladas en estas longitudes de onda.

Tales cambios en la manera de pensar son los frutos de un esfuerzo de siglos para traer la totalidad del cosmos dentro del dominio de la percepción humana. Los telescopios gigantes y la óptica adaptativa no son sino las últimas armas en esta audaz lucha.

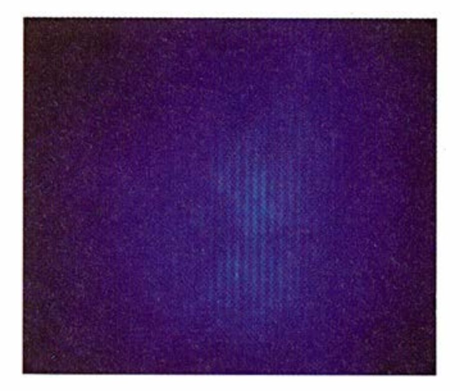
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

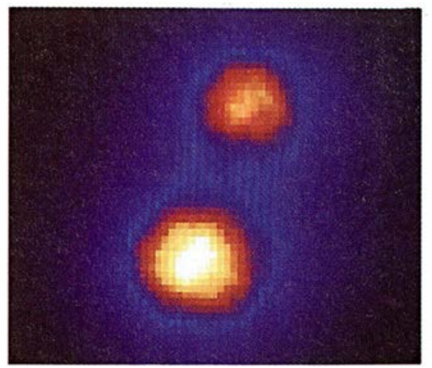
ADVANCED TECHNOLOGY OPTICAL TELESCOPES IV. Dirigido por L. D. Barr. Bellingham, Wash., SPIE, 1990.

THE NEW GROUND-BASED OPTICAL TELESCOPES. Buddy Martin, John M. Hill y Roger Angel en *Physics Today*, vol. 44, n.º 3, págs. 22-30; marzo de 1991.

WHEN BIG IS BEAUTIFUL. S. R. Kulkarni, M. Shao y C. A. Haniff en *Nature*, vol. 352, n.º 6334, págs. 383-384; 1 de agosto de 1991.

THE DECADE OF DISCOVERY IN ASTRONOMY AND ASTROPHYSICS. National Research Council. National Academy Press, 1991.





7. LA OPTICA ADAPTATIVA GUIADA POR LASER muestra sus posibilidades en estas imágenes de prueba de una estrella en la Osa Mayor. Ambas imágenes provienen del mismo telescopio de 1,5 metros. La imagen no corregida muestra sólo una débil mancha (*izquierda*); el sistema de óptica adaptativa produce una imagen superior, reveladora de que la estrella es doble (*derecha*).

Ciencia y empresa

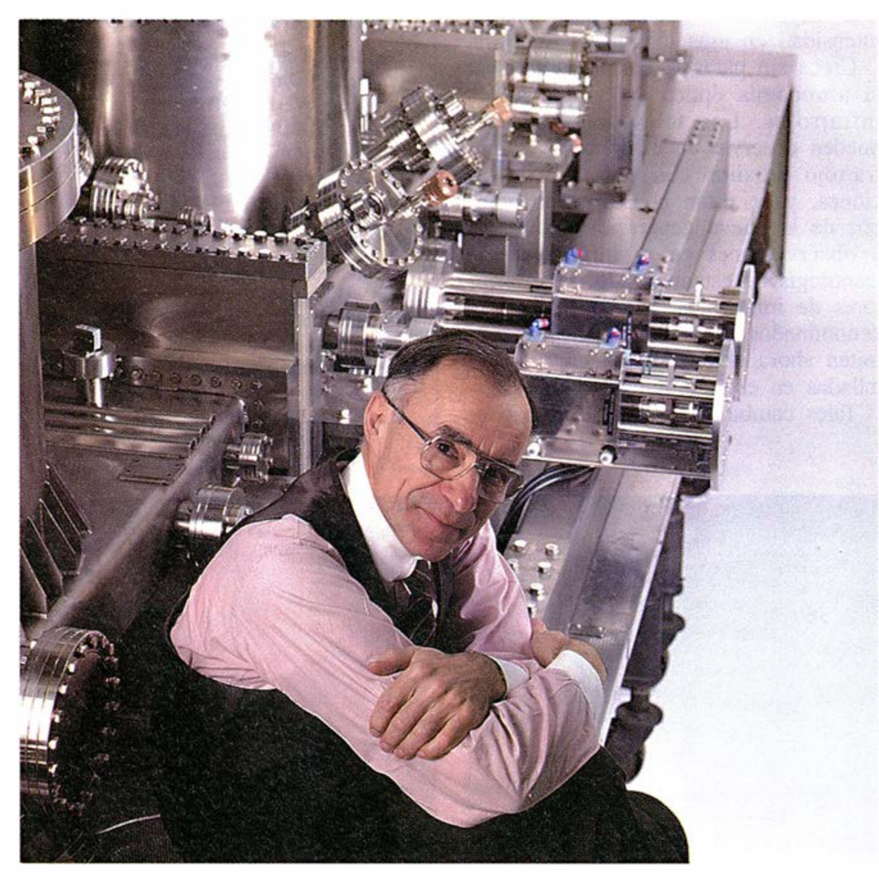
Por una investigación rentable

Cae la tarde en Murray Hill, la colina de New Jersey donde se asientan los laboratorios Bell AT&T. No hay nadie. Sólo Henryk Temkin, quien acompaña a un visitante por el largo pasillo de cemento, el mismo que han pisado los mejores científicos norteamericanos de las últimas décadas, que conduce a un un laboratorio henchido de máquinas. Allí, un aparato de deposición química de vapor organometálico va recubriendo una oblea de semiconductor con capas de otros semiconductores; apenas mide cada una átomos de espesor.

Temkin se ha ganado una envidiable reputación como creador de estructuras exóticas con tales herramientas. Desde noviembre de 1990, sin embargo, ha debido consagrar sus energías a un objetivo más humilde y más práctico: mejorar el proceso de fabricación de cierto láser de estado sólido. No escribirá ningún artículo antológico sobre el tema, ni le invitará ningún centro afamado para que diserte sobre ello. En contrapartida, y a modo de hiato con el pasado, AT&T ha canalizado ese trabajo hacia la línea de producción.

No se ha recorrido aún todo el trecho y empiezan a oírse, por igual, voces de aplauso y ruidos de desagrado entre los ayudantes de Temkin. Las razones de esa conducta dispar nada tienen que ver con la calidad del trabajo. El proyecto se ha convertido en la avanzadilla de los cambios que se están operando en el corazón de los laboratorios Bell, el grupo de investigación del área 11, la misma que creó el transistor, el láser y otras innovaciones con sello de Nobel. Se trata de acotar qué es lo que debe investigarse en los Bell.

La tarea ha recaído sobre los hombros de Arno A. Penzias, vicepresidente de investigación y premio Nobel, recibido por el co-descubrimiento de la radiación cósmica de fondo. Hace más de un año, Penzias se embarcó en una reorganización a fondo de las divisiones de investigación de los laboratorios Bell. Se propuso, de entrada, acabar con la duplicación de esfuerzos y ligar estrechamente ciencia básica e ingeniería de AT&T; es decir, investigadores, como Temkin, y lo que allí se llama unidades comerciales.



1. ARNO A. PENZIAS, vicepresidente de investigación de los laboratorios Bell, encargado de relanzar y hacer rentable esa institución sin arrumbar la investigación básica. Foto: Louis Psihoyos/Matrix.

Pero el buque insignia de la industria con soporte investigador propio de los Estados Unidos, los laboratorios Bell, está decidido a modificar su rumbo. Desde la terminación de la segunda guerra mundial, los investigadores llevaban su propio ritmo confortable, separado del mundo de la fábrica. AT&T se sentía maternalmente orgullosa de su división de investigación, y hacía alarde de su categoría científica en anuncios de ventas y promoción y en los informes anuales. Por su parte, el personal investigador vivía convencido de que había venido a este mundo a ensanchar las fronteras de la ciencia, a hacer avanzar el conocimiento, aunque de ello se beneficiara quizá también la compañía que le pagaba.

Este modelo de laboratorio de investigación pura incubado bajo el abrigo de una poderosa empresa lucrativa no sirve ya. Las razones, escuetas, aparecen en titulares de los periódicos. Las empresas tecnológicas norteamericanas —desde IBM y AT&T hasta otras más modestas— se hallan en crisis. El mercado lo acapara la competencia foránea. Los costes, sea de capital inversor, sea de nóminas, se están poniendo por las nubes. Por contra, los productos avanzan del laboratorio a la fábrica a paso de tortuga. En resumen, ha sonado la hora del cambio para Bell. No importará tanto si sus hombres producen buena ciencia cuanto si la empresa goza o no de buena salud.

Lo difícil ahora es encontrar la nueva forma de ensamblar investigación y producción. Hay otras cuestiones de fondo también que preocupan a muchos. ¿Cuál es el objetivo de la investigación en una empresa? ¿Por qué debe una compañía financiar investigación básica fuera de sus inmediatos intereses? ¿Pueden los trabajos de investigación hacer avanzar la ciencia y reforzar a la vez la empresa que la patrocina? Mientras se buscan soluciones, se ensaya con experimentos como el de Temkin.

El proceso de cambio ha sido traumático para muchos investigadores de los laboratorios Bell, un tanto escépticos ante las nuevas directrices. A muchos les preocupa que se abandonen campos básicos de física del estado sólido y ciencias de los materiales. ¿Acaso, preguntan, puede realizarse investigación fuera de Bell?

Predomina el sentimiento de especies amenazadas de extinción. Algunos apocalípticos vaticinan años obscuros para el desarrollo técnico de los Estados Unidos. El propio Penzias reconoce que las cosas no son tan fáciles como antaño. Su desafío: transformar la investigación en productos más rápidamente, sin desterrar el medio creador que tantos progresos científicos auspició, el motivo de su propio Nobel, sin ir más lejos. De momento ha puesto orden severo en la multiplicidad de proyectos y laboratorios, insistiendo en la relación inversión-rentabilidad; dicho de otro modo, menos dinero para física básica y ciencias de los materiales y mayor desembolso en soporte lógico e información.

Pero el cambio más importante ha sido en la acomodación del personal, una plantilla de 1200 expertos. Ha asignado la mitad a los grupos comerciales, relacionados con la fabricación y la mercadotecnia. Además, cada director de línea de investigación ha recibido la orden de trabajar en sintonía con una unidad comercial.

A los directores de investigación cumple fomentar proyectos cooperativos entre el laboratorio y los departamentos comerciales. Se acabaron, pues, los años en que el investigador vivía en su torre marfileña contemplando el éxito de sus escritos o contando el número de conferencias impartidas. Las tensiones no faltan, pues no es fácil adivinar de pronto en qué aplicar la investigación básica que se está desarrollando.

Sírvanos de ejemplo el caso de un veterano, Alan Huang. Durante los últimos siete años había perseguido sin descanso y con tenacidad un objetivo: construir un ordenador completamente óptico, que funcionara con luz, o fotones, en vez de electrones. Para otros, sin embargo, una estrategia más realista debería basarse en un híbrido de componentes ópticas y electrónicas. En su empeño, el grupo de Huang se apuntó éxitos notables: propiciaron la invención del láser de superficie emisora, impulsaron el uso de la técnica de los circuitos integrados para construir sistemas minúsculos de lentes ópticas y construyeron algunas de las primeras puertas lógicas completamente ópticas. Pero al no verse un resultado a corto plazo, la empresa ha puesto plomo en las alas de Huang, cercenándole el presupuesto.

Tampoco escasean los equívocos. Temkin se propuso idear mejores métodos de fabricación para láseres especiales. El proyecto empezó a tomar cuerpo cuando la planta de microelectrónica de AT&T en Reading necesitó ayuda para la fabricación de láseres de estado sólido capaces de funcionar en ambientes muy calientes.

Tras muchas idas y venidas, Temkin y sus colaboradores se ponen manos a la obra: ensayan en miniatura lo que la planta va a producir a escala industrial. Y comienza entonces el trasiego de información, del laboratorio a la fábrica. Lo paradójico del caso es que se entiende mejor con los responsables de la planta que con el jefe técnico de la división del proyecto.

Dentro del ámbito del factor humano, los científicos, Temkin entre ellos, se preguntan por la gratificación o recompensa que recibirán por cada logro. Antes contaban con las publicaciones y otros medios de labrarse su fama o consolidar su reputación. Ahora los móviles son, para todos, distintos.

Antes los Bell contrataban a figuras de relumbrón. Llamaron a los jóvenes más brillantes, creando una casta duramente competitiva de brahmanes científicos. Esa arrogancia intelectual se traducía frecuentemente en una feroz pasión por demostrar un resultado, y condujo a los hitos que tejieron la historia gloriosa de los Bell. Ahora habrá que primar la labor de equipo.

Pensando en las máquinas que remedan el pensamiento

En 1981, un estudiante de segundo ciclo del laboratorio de inteligencia artificial de Marvin L. Minsky, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, escribió un curioso informe. Primero se quejaba de la lentitud de los ordenadores: en cuanto uno intenta introducir una chispa de inteligencia en ellos, se atascan todavía más. Y propuso, en segundo lugar, una solución: crear un nuevo ordenador mediante la conexión de miles de procesadores débiles.

Diez años más tarde, W. Daniel Hillis y su empresa Thinking Machines se disponen a sacar su tercer ordenador basado en esa idea. La nueva máquina debe poseer suficiente velocidad y gracia para empezar a trastear con la inteligencia artificial. Según Hillis, la velocidad de procesado del ingenio, bautizado con el anagrama CM-5, podría rondar el billón de operaciones en coma flotante por segundo (teraflops), meta afanosamente buscada por más de media docena de los principales fabricantes de superordenadores del mundo.

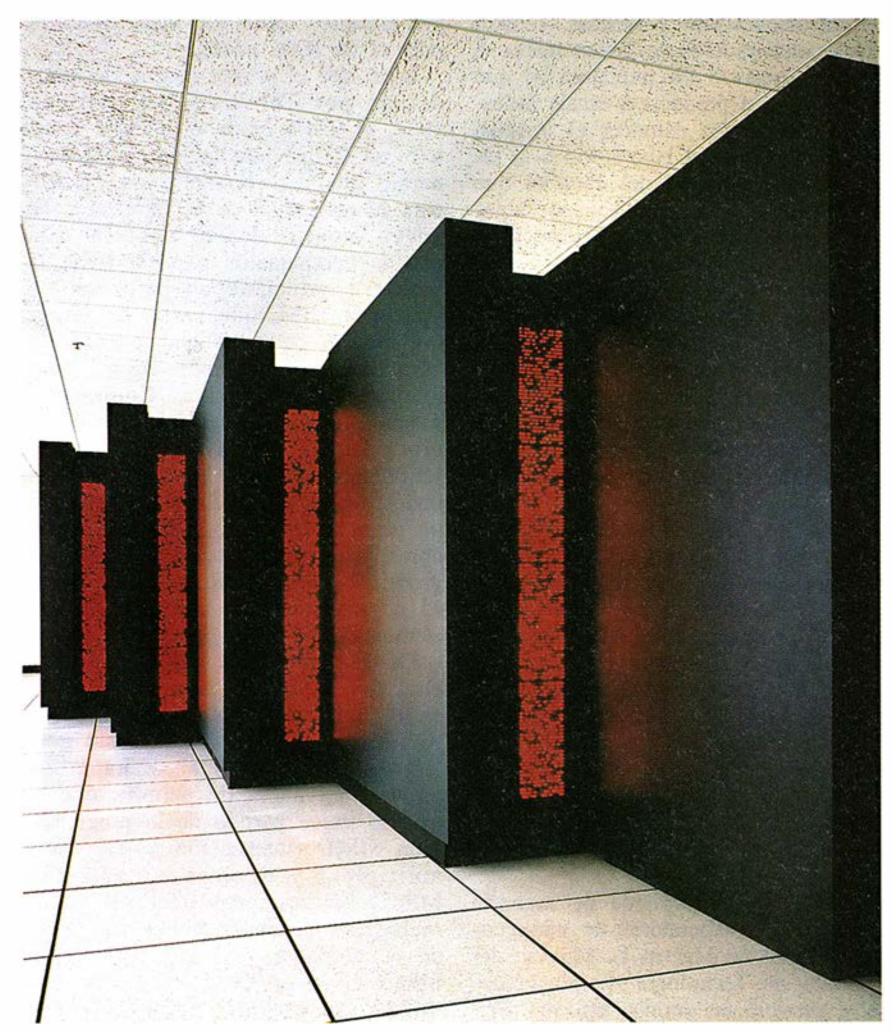
Basándose en ese proyecto, Hillis afirma hallarse capacitado para conectar unos 16.000 nodos procesadores y calcular "cómodamente" al nivel de teraflops. Thinking Machines no ha indicado todavía el precio de su modelo, cuya extensión podría ocupar una cancha de tenis. Los CM-5 más pequeños oscilarán entre los 150 millones de pesetas para un prototipo de 32 nodos procesadores hasta los 2000 millones para el de 8000 nodos.

Igual que el primer ordenador introducido por Thinking Machines en 1987, el CM-5 es un procesador paralelo, en el que intervienen simultáneamente muchos elementos de cálculo para la resolución de un problema. El nuevo modelo deberá impulsar aún más la computación paralela hacia la corriente principal, en parte con la ayuda de IBM, que acaba de firmar un acuerdo de investigación conjunta con Thinking Machines. Ahora bien, mientras las primitivas Connection Machines fiaban en miles de unidades procesadoras de un bit, de relativa sencillez, los CM-5 podrían usar 32 nodos procesadores. Estos se basan en un paquete de cuatro pastillas aceleradoras junto con un complicado microprocesador llamado RISC, que funciona a gran velocidad con instrucciones elementales.

Desde el punto de vista del usuario, el CM-5 le ayudará a salvar el hiato entre las dos escuelas de programación paralela que se han contrapuesto a lo largo de los últimos años. La nueva arquitectura habrá de permitir que el usuario saque partido de la programación SIMD (instrucción única, datos múltiples) y de la programación MIMD (instrucciones múltiples, datos múltiples). Hillis se había decantado en un comienzo por la programación SIMD, en la que se transmite una instrucción a todos los procesadores, que realizan luego la operación con sus propios datos. Otros informáticos insistieron en la MIMD, en la que procesadores recurren a instrucciones diferentes para manipular grupos diferentes de datos. Aunque las arquitecturas MIMD se adaptan con mayor flexibilidad a una gama de problemas más amplia que las SIMD, cuestan programar.

A lo largo del último par de años, las máquinas SIMD han ido acercándose al diseño MIMD. En los CM-5, cada nodo está preparado para operar con su propio conjunto de instrucciones (al modo de las MIMD) y para hacerlo con instrucciones transmitidas a todos los procesadores (SIMD). Podemos sincronizar a voluntad los nodos que operan de forma independiente. En razón del trabajo a realizar, los nodos procesadores podrían acometer 10.000 operaciones sin estar sincronizados o, por contra, comunicarse entre sí a cada paso.

No es tarea menor, sin embargo, establecer una conexión física entre nodos. Thinking Machines y MIT han creado una red donde la cantidad de comunicación posible entre procesadores aumenta al mismo ritmo al que se agregan nuevos procesadores. Hay reticencia a dar pormenores sobre la red



2. *LOS ORDENADORES no tienen por qué parecer neveras, declara Danny Hillis. Esta versión de su nuevo superordenador hace uso de 1024 nodos procesadores. Foto: Steve Dunwell.*

que ajusta la máquina "a medida". Aun cuando la comunicación entre nodos físicamente adyacentes entre sí será más rápida que entre nodos distantes, la empresa afirma que la geometría precisa de los nodos importa mucho menos que en los prototipos anteriores de Connection Machines.

El esquema de comunicaciones es clave para otras dos peculiaridades del aparato: su seguridad de funcionamiento y la velocidad con que busca o envía datos a los bancos externos de memoria (llamados I/O o de entrada/salida). Casi una tercera parte de los circuitos de la red están dedicados a garantizar una correcta operación. Si fallase un procesador, la máquina reasignaría automáticamente las tareas y los datos sin apenas poner el pie en el freno.

El envío de datos hacia una memoria externa y la recepción de otros desde ella viene a ser una extensión de la red de comunicaciones empleada en el interior de la máquina. Gracias a lo cual, podemos agrupar múltiples puertos de I/O, cada uno de los cuales opera a unos 20 megabytes por segundo, y transferir datos a cientos de megabytes o incluso decenas de gigabytes por segundo.

Hillis aventura que la dúplice capacidad SIMD/MIMD de su máquina abrirá las puertas a nuevas clases de problemas, que los primitivos modelos de Connection Machines dejaban sin resolver. El talón de Aquiles de Thinking Machines, sus sistemas de programación, podrá superarse tras la firma contractual con IBM, y ésta, a su vez, se verá favorecida en las arquitecturas paralelas.

Esparadrapos de factores de crecimiento

Lo que parece título de una balada constituye un grave problema médico para muchos sujetos: hay heridas que no curan. Las sufren, de modo particular, los diabéticos, cuya pérdida de sensibilidad en los miembros favorece la permanencia de lesiones. Quienes presentan un sistema inmune bloqueado por terapias tóxicas o desarmado por el SIDA arrastran ulceraciones que se resisten a curar.

Hasta ahora, la medicina se ha sentido poco menos que impotente. La solución puede venir, sin embargo, de la biotecnología, de los factores de crecimiento: proteínas naturales que se hallan en altas concentraciones en los puntos donde las heridas sanan normalmente.

No hay empresa del sector (Genentech, Amgen, Chiron, Synergen, California Biotechnology y ZymoGenetics) que se precie que no se halle tras la síntesis de ese tipo de substancias. Ni le van en la zaga los laboratorios farmacéuticos, por ejemplo, Merck, Cyba-Geigy y Bristol-Meyers Squibb, ellos o algunas de sus compañías subsidiarias.

Los factores de crecimiento han comenzado por aclarar el proceso gradual de sanación de las heridas, en el que cada uno interviene en una fase distinta. Así, el factor de crecimiento derivado de plaquetas (PDGF) incoa la curación reclutando células que luchan contra la infección. Otros, como el factor de crecimiento de fibroblastos (FGF), fomentan la formación de nuevos vasos sanguíneos que proporcionan nutrientes y oxígeno a las células locales. El factor de crecimiento transformante beta (TFGb) aparece más tarde, para tejer la matriz donde se agruparán las células.

Los nombres de los factores reflejan los tejidos de donde fueron aislados, si bien los expertos saben ya que las proteínas existen en pequeñas cantidades en cualquier tejido y realizan otras funciones. A modo de botón de muestra, se acaba de detectar la presencia de PGDF en el cerebro, lejos de las plaquetas que circulan por la sangre.

Determinar cuál será el factor más eficaz para tratar una clase de herida equivale a identificar dónde reside la causa de persistencia de la misma. Por eso, en cuanto se sabe qué función cumple un factor de crecimiento, se le busca aplicación donde aquélla falla. Se está ensayando, por ejemplo, con el FGF para tratar las inflamaciones debidas a la presión y las úlceras diabéticas y venosas. Los tres trastornos afectan a la "microcirculación" capilar. No obstante la confianza depositada en esa línea particular de investigación, los resultados tardarán en llegar por los obstáculos que han venido apareciendo. Sin olvidar los pasos legales ante la administración para poderlos incluir entre los medicamentos reconocidos. O los litigios por las patentes.

El avance en la investigación hace prever la administración combinada de varios, lo que podría acelerar el postoperatorio de pacientes inmunosuprimidos. Pero otros prefieren mantener todavía su fe en la milagrosa capacidad del organismo para sanar por sí solo.

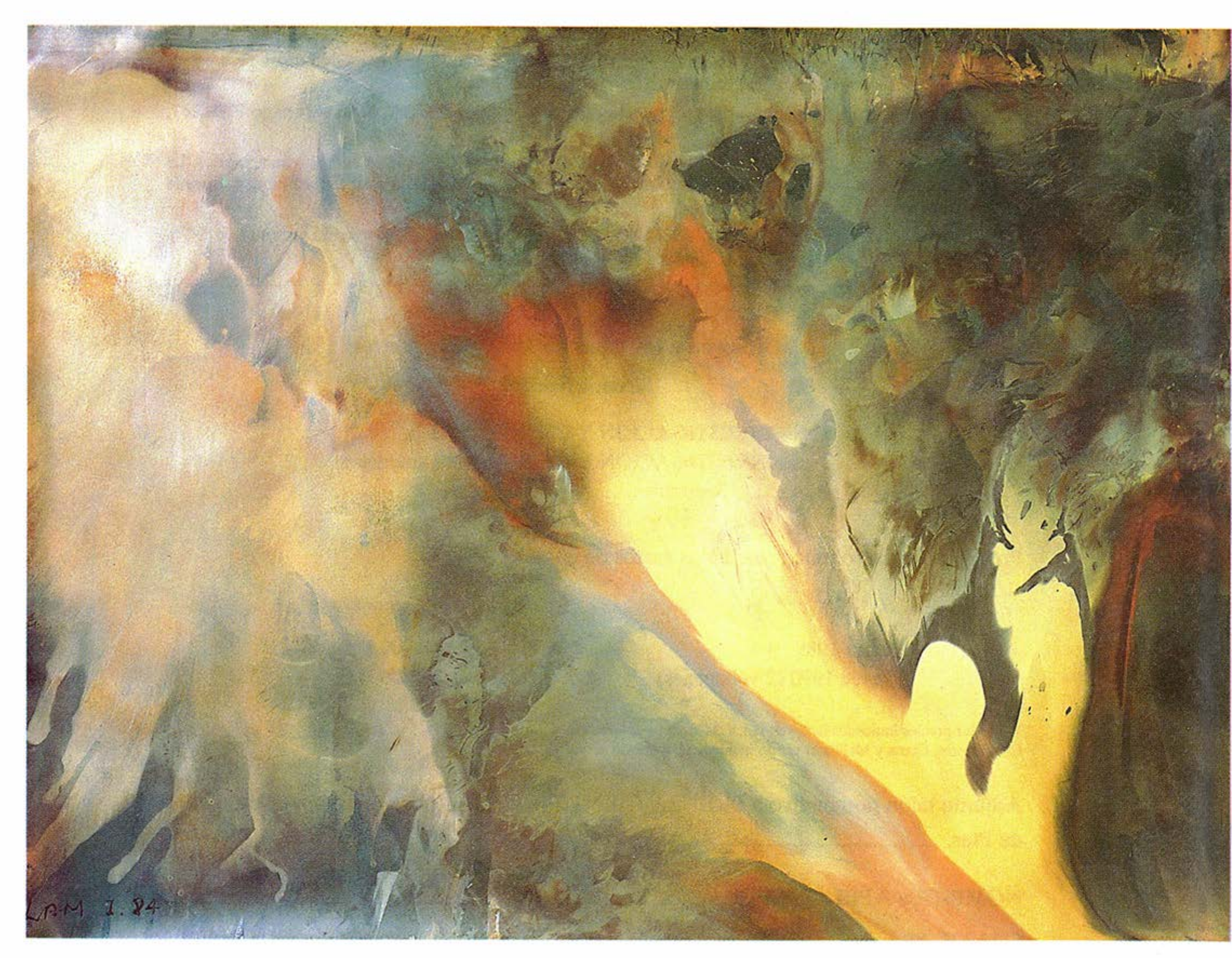
Taller y laboratorio

Un procedimiento original para producir imágenes en color sobre papel fotográfico para blanco y negro

Dominic Man-Kit Lam, Bryant W. Rossiter y Alexandra J. Baran

Quienes de nuestros lectores sean aficionados a la fotografía y revelen sus propios carretes habrán observado que, en ocasiones, los positivos pueden aparecer decolorados por manchas marrones o amarillas. Eso mismo me ocurrió a mí (Lam) una tarde de otoño de 1980, cuando me hallaba revelando unas fotos en blanco y negro para un trabajo de investigación de la Facultad de Medicina de Baylor. En aquel momento, el hecho me llamó fuertemente la atención. ¿Cómo era posible que apareciesen aquellos colores, siendo así que los materiales que había empleado en el cuarto oscuro no contenían tintes ni pigmentos?

Lo cierto es que mi curiosidad se despertó hasta el extremo de que me propuse averiguar si sería posible desarrollar un procedimiento para generar colores sobre el papel fotográfico y para controlar el proceso de generación con fines artísticos, sin emplear otros materiales que los habituales en la fotografía en blanco y negro. Para ello confiaba en que mis veinte años de experiencia en la práctica de la pintura acaso pudieran serme útiles de un modo u otro. La tarea la centré en torno a establecer empíricamente qué condiciones de luz y tiempo permiten



1. Pasión 1984

predecir la aparición de cada color. Comprendí, además, que me sería necesario tantear con las concentraciones de los líquidos fotográficos (activadores, reveladores, estabilizadores y fijadores).

Así lo hice, y ya antes de 1983 pude establecer un procedimiento para crear los colores primarios (rojo, azul y amarillo) y combinarlos. En los ocho años que siguieron, perfeccioné la técnica ensayando con distintas clases de papel y líquidos fotográficos, lo que me permite controlar mejor los colores, los matices y la composición. En las figuras que acompañan a este artículo podrán apreciarse algunos de los resultados conseguidos.

Pero, si bien el enfoque práctico me llevó efectivamente a dar con un método para producir colores con materiales para fotografía en blanco y negro, quedaba en el aire la explicación científica del proceso. Como causas de las coloraciones indeseadas de los positivos suelen citarse el mezclado incorrecto de las soluciones, el deterioro de éstas o un papel fotográfico defectuoso; pero esto, sin más explicaciones, nada esencial aclara acerca de los procesos físicos o químicos subyacentes.

En el verano de 1989 Rossiter, que firma este artículo conmigo y Baran, me visitó en Houston y mis cuadros captaron su interés. Reparó en sus vívidos rojos y amarillos, en sus visos metálicos y en su excepcional estabilidad frente a la luz. (Algunas de mis obras han estado directamente expuestas a la luz solar ambiental sin desteñirse durante más de siete años.) Gracias a estas y otras observaciones, dedujo que los colores de mis cuadros se deben a la difusión de la luz por las minúsculas partículas de plata que contiene el papel fotográfico. Fue entonces cuando Rossiter acuñó el término "cromosquedasia", recurriendo a raíces del griego clásico para expresar "coloración por difusión luminosa".

En la mayoría de las pinturas, los colores nacen de un proceso conocido como síntesis sustractiva. Los pigmentos azules, por ejemplo, reflejan la luz azul mientras que absorben la mayoría de las demás. Los colores de las fotos convencionales resultan también de un proceso sustractivo. Aunque las fotos, en vez de pigmentos, requieren emulsiones sensibles al color y agentes de revelado que producen o desprenden tintes.

Los papeles fotográficos para blanco y negro contienen sales de plata, las cuales, por acción de la luz y compuestos químicos, precipitan partículas del metal. Estas se limitan a absorber la luz y producen tonalidades del negro. Las sales no expuestas a la luz no dan partículas de plata y son eliminadas en el revelado, dejando al descubierto el blanco del papel. En nuestro método se sigue un proceso muy parecido a éste, pero con el condicionante de que el crecimiento de las partículas sea cuidadosamente controla-



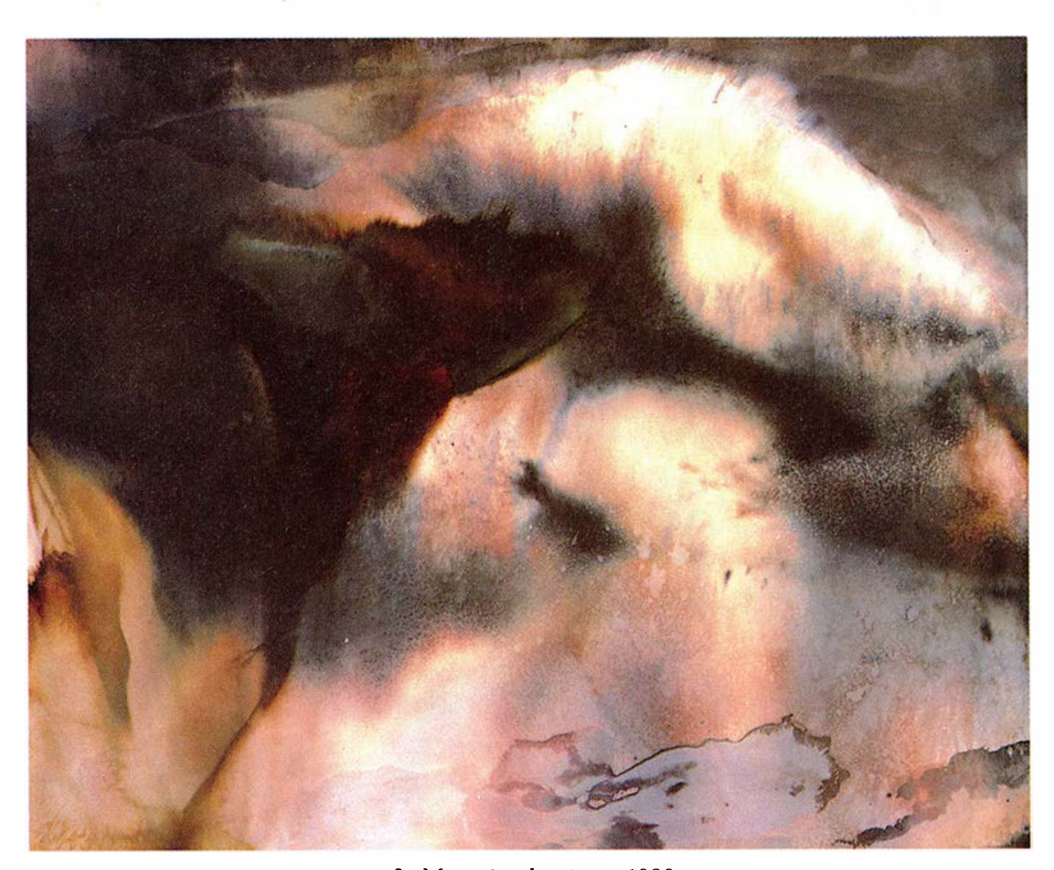


do por exposición a luz y productos químicos.

En la pintura cromosquedásica, las partículas de plata producen los colores merced a un proceso llamado difusión de Mie, porque fue Gustav Mie quien le dio descripción matemática en 1908, para lo cual empleó un modelo de medio difusor constituido por esferas de tamaño y características eléctricas similares. Descubrió así que la longitud de onda de la luz que difunde el medio es función del tamaño de las esferas.

La teoría de Mie contribuyó a explicar por qué el cielo es azul y el Sol se ve rojo al amanecer y al atardecer. Si el cielo es azul es, en parte, debido a que el polvo, el vapor de agua y otras partículas suspendidas en la atmósfera son del tamaño adecuado para difundir sólo la zona azul del espectro visible. Análogamente, algunos de los rutilantes colores del Sol naciente o poniente se deben a partículas atmosféricas. (Desde luego, al color del firmamento contribuyen muchos tipos de procesos de difusión, absorción y refracción.)

La formación de las partículas en los complejos papeles fotográficos modernos se aparta mucho de las condiciones ideales supuestas por Mie. Un cuadro cromosquedásico se compone



3. Montaña de nieve, 1989



de partículas de plata que varían notablemente en forma y tamaño. Aun así, las fórmulas de Mie expresan bien la correlación entre tamaño de partícula y color generado por cromosquedasia.

Donald L. Black, de la División de Investigación de Ciencias Fotográficas de Eastman Kodak en Rochester, confirmó por microscopía electrónica que las áreas de los cuadros cromosquedásicos ocupadas por un determinado color albergan unas partículas de plata de tamaño bastante uniforme. En concordancia con la teoría, las partículas que producían luz amarilla tenían un diámetro de 10 a 30 nanómetros, mientras que las que difundían la luz roja tenían una anchura de 35 a 65 nanómetros. La ciencia desconoce aún las razones últimas de la influencia de la forma y el tamaño de las partículas en la difusión de la luz y, por tanto, en la cromosquedasia.

No se crea que la pintura cromosquedásica requiere una destreza especial, aunque desde luego una cierta dosis de talento artístico favorecerá los resultados y, además, dictará mejor cuáles imágenes vale la pena conservar y cuáles pueden quedarse en el cuarto oscuro.

Antes de retirar el papel fotográfico de su caja protectora es de todo punto necesario tener ya reunidos y listos los materiales y las soluciones necesarios. Para los cuadros que a continuación describo empleé papeles y líquidos Kodak, aunque los de otras marcas no tienen por qué no dar también buenos resultados.

Préstese atención a las advertencias relativas a los distintos productos químicos. (Los proveedores de líquidos fotográficos facilitan gratis las "normas de seguridad'' de cada producto.) Al mezclar los líquidos hay que usar gafas protectoras y ropa vieja que cubra todo el cuerpo. Algunos líquidos son ácidos fuertes que pueden ser muy dañinos si se ingieren o salpican la piel



4. Montaña amarilla, 1989



5. *Correr*

o los ojos. No echar nunca agua sobre ácido concentrado. Las soluciones deben siempre prepararse añadiendo, con gran cuidado, el ácido sobre el agua. Todos los reactivos que se mencionan deben disolverse con agua hasta la concentración deseada.

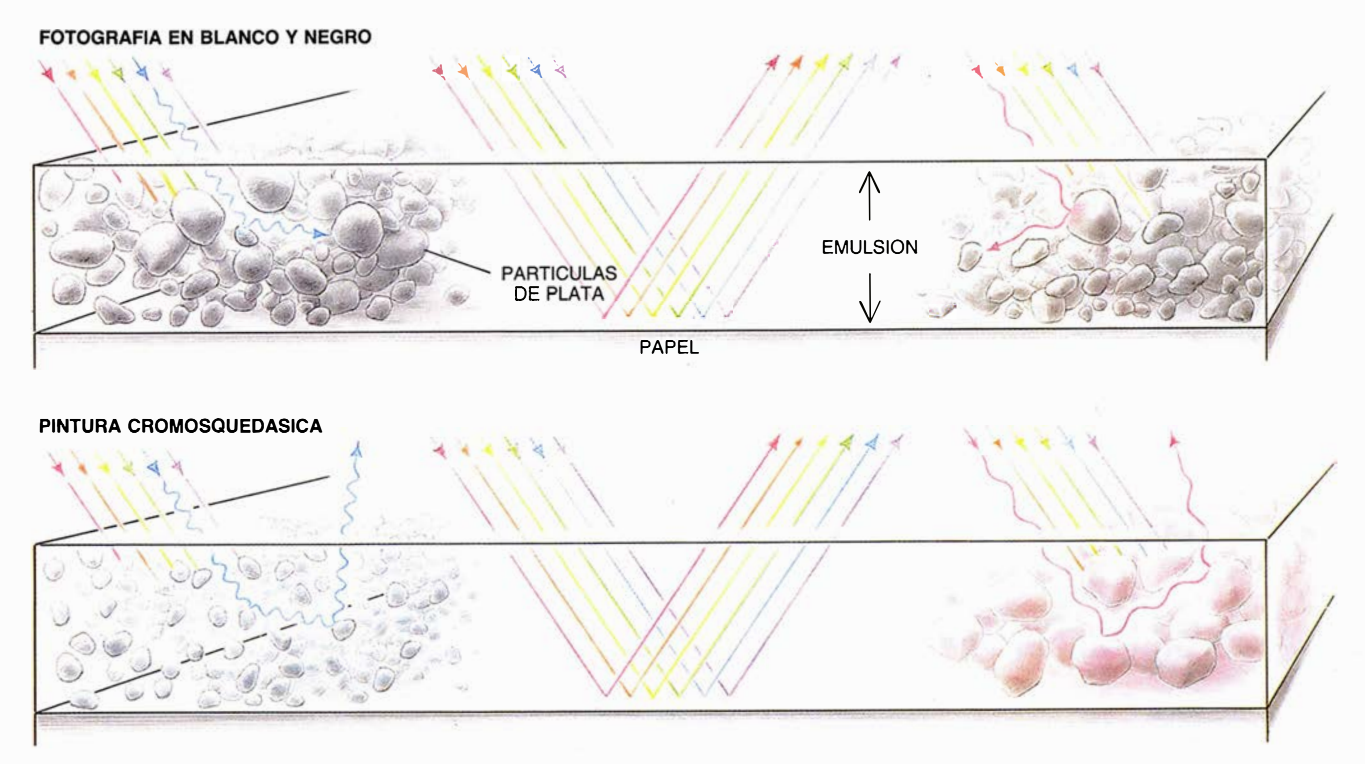
En los párrafos que siguen describo tres trabajos de complejidad creciente. Sugiero a los lectores que, al principio, se atengan a mis instrucciones y, antes de pasar al trabajo siguiente, practiquen un poco para ir adquiriendo tiento en las manipulaciones.

Entre arrecifes de coral es un cuadro abstracto realizado sólo con los métodos cromosquedásicos más elementales. Lo primero fue exponer a una tenue luz roja, durante cinco minutos, una hoja de 60 × 40 cm de papel policontraste Kodak 3RCF. Seguidamente derramé sobre él media copa de estabilizador Kodak Ektamatic S30 al 10 por ciento, solución que arremoliné para que formara un dibujo atractivo y, al final, las zonas a las que llegó quedaron de amarillo claro.

En seguida, sobre otras zonas del papel, vertí una pequeña cantidad de activador Kodak S2 al 10 por ciento, seguida de Dektol al 50 por ciento. Estas soluciones produjeron rojos, naranjas, amarillos, verdes, azules y grises. Durante cinco minutos expuse el papel a la luz de una lámpara fluorescente. Por ultimo, lo sumergí en fijador rápido Kodak al 50 por ciento; luego, lo enjuagué con agua y lo dejé secar.

Esforzándose un poco más, los lectores serán capaces de crear imágenes como Correr. Valiéndome de un pincel de artista y tinta negra, dibujé un caballo al galope en papel de arroz. Seguidamente lo fotografié en papel Kodak para blanco y negro y revelé el negativo. Con una ampliadora traspasé la imagen negativa a papel Kodabrome (de 20 × 25 cm).

Sin perder un instante, con luz roja, vertí sobre el papel estabilizador al 10 por ciento y lo arremoliné de un sitio a otro. Lo mismo hice con activador S2 al 10 por ciento sobre la misma zona del papel; así, el estabilizador y el activador se combinaron dando na-



6. *CUADROS CROMOSQUEDASICOS y su diferencia de las fotografías en blanco y negro; en aquéllos, las partículas de plata tienen diámetros similares dentro de cada zona. Las fotografías son negras en las zonas donde las partículas absorben la luz. En la pintura cromosquedásica, las partículas de un tamaño dado difunden un determinado color de la luz.*



7. *Otoño en Nueva Inglaterra*

ranjas. Para crear un rojo subido, apliqué Dektol al 50 por ciento. Con un trapo, extendí fijador al 50 por ciento por todo el papel y luego metí éste en el fijador durante 20 minutos. Finalmente, lo bañé en agua durante 30 minutos y lo dejé secar.

Para el cuadro impresionista *Otoño en Nueva Inglaterra*, combiné la cromosquedasia con esmaltes ordinarios. Bajo luz roja, corté un trozo de 100 × 300 cm de papel policontraste de un rollo grande. Con un pincel humedecido en estabilizador S30 concentrado, dibujé el pico nevado de una montaña. Encendí luego las luces fluorescentes del cuarto; expuse el papel durante cinco minutos.

Para dotar a la montaña de ribetes marfileños, con un pincel, y bajo luz roja, apliqué estabilizador al 20 por ciento. Otras zonas, para crear el contorno de un lago, las pinté con estabilizador diluido. Conseguía tonos marrones, si trabajaba esas zonas con activador S2 al 50 por ciento. Con una estilográfica mojada en el activador, tracé el contorno de árboles en el segundo plano de dibujo. Sombreé de marrón los troncos aplicando estabilizador y luego activador.

La emulsión así obtenida la expuse durante una media hora a luz fluorescente y luego apliqué fijador al 50 por ciento, que rocié con un pulverizador por todo el papel. Al cabo de 20 minutos, lo lavé todo con una manguera de jardín y lo dejé secar. Entonces, con esmaltes, añadí la neblina de las montañas, el azul del agua del lago y el amarillo y el rojo de las hojas de los árboles.

Los lectores que se animen a explorar las muchas posibilidades artísticas de la cromosquedasia deberán tener muy en cuenta que la variable que controla el color es el tamaño de las partículas de plata que se producen al descomponerse las sales de plata que contiene el papel fotográfico. Y para controlar el crecimiento de las partículas contamos con las variables sobre las que podemos actuar en el cuarto oscuro, es decir, intensidad y clase de iluminación, concentración de las soluciones y tiempos de reacción. Las combinaciones de éstas son infinitas. Por otra parte, el trabajo podemos orientarlo a controlar estrechamente las variables para conseguir cuadros figurativos, o bien dejar que la naturaleza juegue con la luz y la química para generar imágenes abstractas. Otra posibilidad es combinar la cromosquedasia con la fotografía convencional o con vehículos tales como pinturas acrílicas u óleos, acuarelas o esmaltes. Pero recordemos siempre que la cromosquedasia nos proporciona unos vivos colores metálicos que se asocian, se mezclan y se sobreponen unos a otros y que, además, se conservan durante decenios gracias a unas diminutas partículas de plata incrustadas en papel.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

NEBLETTE'S HANDBOOK OF PHOTOGRAPHY AND REPROGRAPHY: MATERIALS, PROCESSES AND SYSTEMS. C.B. Neblette. Van Nostrand Reinhold, 1977 .



8. *Entre arrecifes de coral*

Juegos matemáticos

Una sorprendente estrategia para sacar partido de una información en apariencia inútil

Ian Stewart

La urraca Pegasa, tan grande y voladora como el caballo de su nombre, se posó con suavidad en el brazo de Perseo, hijo de Zeus y Dánae. El desdichado rey de Tirinto quería encontrar a la hermosa Andrómeda.

–"¡Qué raro!", dijo a Pegasa. "Estaba convencido de que estaría encadenada a una roca."

–"Apuesto a que se encuentra en una de estas tres cavernas", adelantó Pegasa.

–"¡Qué horror!", exclamó Perseo. "¡Las entradas están completamente obstruidas por peñascos!"

–"Ata a mi cola un extremo del cinturón mágico de Hipólito y a un peñasco el otro, y Sésamo se abrirá", afirmó el ave.

–"De acuerdo", se avino el héroe. "Comencemos por la primera caverna."

–"Pon atención. ¿No se te olvida nada?", refunfuñó la urraca.

–"¡Vaya, oh urraca engreída!, ¿qué pasa ahora?"

–"Andrómeda se halla en una de las cavernas, pero en cada una de las otras hay una gorgona: Medusa en una y Esteno, su hermana gemela, en la otra; y ambas tienen poder para petrificarte con sólo una mirada."

–"Para eso tengo mi fiel rodela de oro, que devuelve a su gorgónica propietaria toda mirada petrificadora", replicó Perseo.

–"Está demasiado herrumbrosa para resultar eficaz. Por fortuna, nosotras las urracas gigantes gozamos de poderes ocultos conferidos por la diosa Deméter. Y yo sé en qué caverna se halla Andrómeda."

–"¡Formidable! ¡Dímelo enseguida!"

–"Por mala suerte para ti, hemos jurado guardar el secreto, y si nosotras revelamos lo que sabemos, la diosa nos 'entarrinará' (como ella dice para hacernos picadillo y meternos en tarrinas) en un ánfora a 20 metros bajo tierra, por toda la eternidad."

Perseo se detuvo a reflexionar.

–"Te daré mi anillo si me lo dices", prometió.

Pegasa se sintió tentada. ''¡Cuán desmesurado es el poder de las industrias de lujo!'', filosofó, y tuvo el valor de rehusar.

–"A pesar de todo, algo puedo ayudarte."

–"¿Y cómo?"

–"Para empezar, puedo decirte que la probabilidad de que Andrómeda esté en una de las cavernas es un tercio. Por el momento, puedes elegir una caverna y yo veré entonces cuánto es lo que puedo revelarte sin peligro."

–"Si te empeñas... Yo creo... a mí me parece que Andrómeda se encuentra en la caverna del centro."

–"Excelente", dijo la pega. "En este momento puedo revelarte que hay una gorgona en la cueva de la izquierda."

Perseo arrojó al suelo su espada para poder patalear más cómodamente.

–"¿Eso de qué me vale?"

–"Pensé que tal información te incitaría a cambiar de idea."

–"¿Y por qué? Hay necesariamente una gorgona en al menos una de las cavernas que no he elegido. ¿Qué utilidad me reportaría elegir la cueva de la derecha si sólo me dices que hay una gorgona en la cueva de la izquierda? ¡Lo que yo necesito saber es en dónde se encuentra Andrómeda!"

–"¿Mantienes, pues, tu primera elección?"

–"¿Y por qué no? Lo único que has hecho ha sido restringir las posibilidades. En este momento sé que Andrómeda se halla, bien en la cueva del centro, bien en la de la derecha. Las probabilidades de que se encuentre en la que yo he elegido o en la otra son del 50 por ciento en cada caso. No veo ninguna ventaja en cambiar."

–"Bueno, haz como quieras. Lo que pasa..."

–"¡Qué es lo que pasa!", gritó Perseo, exasperado, encaminándose ya hacia la cueva central.

–"Lo que pasa es que tienes el doble de probabilidades de acertar si cambias tu elección. La probabilidad de que Andrómeda se encuentre en la caverna central es de un tercio, ¿no es verdad?"

–"Así me lo has dicho."

–"Bueno. De esta suerte, la probabilidad de errar es doble que la de



1. Perseo, que busca a Andrómeda, es aconsejado por Pegasa.

acertar. La probabilidad de que tú tengas razón es de 1/3, y la probabilidad de que te equivoques es de 2/3. ¿Vale?"

–"¡Pues claro!"

–"Sabemos que tienes doble probabilidad de errar que de atinar. Si cambias a la otra caverna acertarás con frecuencia doble que fallarás. Con otras palabras, tu probabilidad de localizar a Andrómeda es de 2/3 si cambias y de 1/3 nada más si no cambias."

Perseo se acurrucó en el suelo, con la cabeza entre las manos.

–"¡Oh, urraca pérfida, bien sabes cuán poco gustan a los héroes las matemáticas! ¿Cómo podré yo cerciorarme de que tu razonamiento es correcto?"

–"Prueba a seguir el consejo de una autoridad en la materia", sugirió la urraca.

–"¡No! Las probabilidades tienen que ser las mismas. Tú has eliminado una caverna; me quedan, pues, dos, entre las cuales debo elegir. ¡Una y otra son igualmente probables!"

–"No ha sido ése el orden en que hemos operado", murmuró la pega. Y después añadió en voz alta:

–"Es una pega, tienes razón. ¡Haz como más te plazca!"

–"No es otra mi intención", afirmó Perseo. "A decir verdad, estas pegas son absolutamente insoportables. Mas, ¿qué hacer? ¡Menudo dilema...!"

Perseo unció la urraca a la piedra del medio con el cinturón mágico de Hipólito. La roca rodó, liberando la entrada y...

¡Hagan juego, lectoras y lectores! He apostado 3 contra 2 a que Perseo se equivoca. De ser cierto que las probabilidades de éxito son las mismas para una y otra cavernas serán ustedes quienes ganen por término medio, pero desde luego, si la urraca tiene razón y si las probabilidades de fracaso son de 2 contra 1, serán ustedes quienes pierdan en promedio. Y yo tendré mucho gusto en efectuar tantos ensayos como ustedes quieran. Recordemos las reglas:

–Andrómeda está encerrada en una de las cavernas. La probabilidad de que se encuentre en una dada es, pues, de 1/3, cualquiera que sea la caverna elegida.

–Perseo elige una caverna.

–La urraca designa una de las otras dos y declara (sin mentir) que en ella mora una gorgona.

–Entonces Perseo puede elegir la otra caverna. Si conserva su elección primera, yo apuesto 3 contra 2 a que se equivoca; esto es, si Andrómeda se encuentra verdaderamente en la cueva elegida por Perseo, yo pagaré 3 pesetas; en cambio, si hay una gorgona, me tendrán que dar a mí 2 pesetas.

EL VEREDICTO DE LA TABLA DE NUMEROS ALEATORIOS				
CAVERNA DE ANDROMEDA NUMERO A	ELECCION INICIAL DE PERSEO NUMERO B	DESIGNACION DE LA URRACA NUMERO C	PERSEO NO MODIFICA SU ELECCION	PERSEO MODIFICA SU ELECCION
2	1	3	FALLO	ACIERTO
1	3	2	FALLO	ACIERTO
1	1	2	ACIERTO	FALLO
2	2	3	ACIERTO	FALLO
1	3	2	FALLO	ACIERTO
3	2	1	FALLO	ACIERTO
3	1	2	FALLO	ACIERTO
2	1	3	FALLO	ACIERTO
2	2	3	ACIERTO	FALLO
2	1	3	FALLO	ACIERTO
3	3	1	ACIERTO	FALLO
2	3	1	FALLO	ACIERTO
2	1	3	FALLO	ACIERTO
3	1	2	FALLO	ACIERTO
3	3	1	ACIERTO	FALLO
2	3	1	FALLO	ACIERTO
2	2	3	ACIERTO	FALLO
1	3	2	FALLO	ACIERTO
2	1	3	FALLO	ACIERTO
1	2	3	FALLO	ACIERTO

2. Resultados de las tácticas de Perseo, obtenidos con una tabla de dígitos aleatorios.

¿Acepta usted el envite? Anote su decisión en un papelito. ¿Son de 1/2 las probabilidades de Perseo, cambie éste o no su elección (como él piensa) o son de 2/3 si cambia y de 1/3 si no (como afirma la urraca)? Si Perseo tiene razón, gana usted; si la urraca, gano yo.

No hay dificultad en preparar un programa de ordenador que simule el problema y ejecutarlo un gran número de veces, contando el número de veces en que Perseo gana y en cuántas pierde. ¿Preferirá tal vez probar mano con la simulación antes de seguir? Voy a describir un programa análogo en el que, en lugar de utilizar un ordenador, se emplea una tabla de dígitos aleatorios (por ejemplo, la serie de cifras decimales de π o las *Cambridge Elementary Statistical Tables*). He aquí el método. Se usarán sólo las cifras 1, 2 y 3, una por caverna. Estas cifras 1, 2 y 3 son las únicas "aceptables". Procedo entonces a recorrer la tabla de números aleatorios, anotando las cifras aceptables en el orden en que aparecen.

1. La primera cifra A que sea aceptable determina en qué caverna se halla Andrómeda.

2. La segunda cifra aceptable, B, determina la elección de Perseo.

3. La siguiente cifra aceptable, C, diferente de A y de B, determina lo que la urraca informa a Perseo. Tal cifra debe indicar una caverna que albergue a una gorgona (por tanto, C no puede ser A) entre las no elegidas por Perseo (por lo que C no puede ser B). Recordemos que A y B pueden ser iguales, en cuyo caso la urraca elegirá a su capricho una de las dos cavernas que alojan a las gorgonas.

4. Suponiendo que Perseo mantenga su elección, anótese si tiene o no razón.

5. Para comparar, supongamos que Perseo haya tomado en consideración el consejo de la urraca y haya optado por la única caverna distinta de las B y C; tomemos nota, por otra parte, si la elección modificada es correcta.

6. Pasemos a la cifra aceptable que venga a continuación, y repitamos todo el procedimiento.

Hemos hecho la prueba (*véase la figura 2*): si la estrategia de Perseo consiste en no cambiar, tiene razón en 6 ocasiones y se equivoca en 14. Si se aviene a seguir el consejo de la urraca y modifica su elección, acierta 14 veces y se equivoca 6. Sin duda, la urraca tiene razón. ¡Es preferible cambiar!

El resultado es tan contrario a la intuición que no son pocas las personas que se resisten a aceptarlo. El problema provocó no hace mucho gran revuelo en la prensa norteamericana.

Una señora llamada Marilyn vos Savant, que figura en el *Guinness* de récords mundiales como detentadora del más alto cociente intelectual jamás registrado, publica regularmente una columna titulada *Pregúntale a Marilyn*, que aparece en centenares de periódicos americanos. Marilyn planteaba la misma cuestión, aunque en lugar de Perseo en busca de Andrómeda ella describía un participante de un concurso televisivo que debía elegir una puerta de entre tres. Tras una de ellas se ocultaba el primer premio (un automóvil) y tras las otras dos, sendos chascos. Cuando el concursante ha elegido, el presentador señala a una de las dos puertas restantes y dice "detrás de ésta sólo hay un premio de consolación". ¿Debe entonces el concursante cambiar su elección a la tercera puerta? Marilyn, lo mismo que Pegasa, explicaba que las probabilidades de ganar el auto se multiplicaban por dos al cambiar la elección.

Vale la pena citar las cartas de algunos lectores, todos ellos universitarios o pertenecientes a institutos de investigación:

"¡Vaya metedura de pata! En mi calidad de matemático profesional, me preocupa muchísimo la general carencia de sentido matemático del público. Tenga la gentileza de reconocer su error y de ser en lo sucesivo un poco más perspicaz!"

"El mundo tiene ya suficientes personas ignorantes de las matemáticas; por tanto, no es necesario que quien posee el cociente intelectual más alto del mundo contribuya a la propagación de la ignorancia. ¡Vergüenza debería darle!"

"Su respuesta es incorrecta, pero, por si le sirve de consuelo, sepa que muchos de mis colegas universitarios me han dado, al igual que usted, respuestas idiotas."

A todos los cuales Marilyn respondió diciendo que su respuesta era correcta. Hemos representado en la figura 3 una de las varias justificaciones propuestas por ella. Supongamos (para simplificar el razonamiento) que haya sido elegida la caverna 1. Existen entonces tres posibilidades, todas ellas equiprobables, pues, como nos ha dicho la urraca, la probabilidad de que Andrómeda se encuentre en una cueva dada es la misma cualquiera que sea ésta. Los caracteres en rojo designan la caverna (o las cavernas) que la pega puede designar.

Los resultados no admiten duda: la estrategia de Perseo gana una de cada tres veces, mientras que la urraca lo hace en dos de cada tres.

Y se produjeron nuevas protestas:

"Su solución es, a todas luces, contraria a la verdad."

"¿Me permite sugerirle la consulta de un manual cualquiera de teoría de probabilidades antes de lanzarse a solucionar problemas de este tipo?"

"¿Cuántos matemáticos enfurruñados hacen falta para conseguir que cambie usted de opinión?"

"Me deja estupefacto que aún no se haya percatado de su error, tras haber sido corregida por no menos de tres matemáticos."

"¿Será posible que los puntos de vista femeninos sobre las matemáticas sean distintos de los masculinos?"

Marilyn dice haber recibido millares de cartas, casi todas tratando de hacerle ver que estaba equivocada, entre ellas, una del subdirector del Centro Informático del Departamento de Defensa estadounidense y otra de un investigador estadístico del Instituto Nacional de la Salud de aquel país. En total el 92 por ciento de las cartas de los no especialistas afirmaban que la urraca se equivocaba y el porcentaje era todavía del 65 por ciento en las cartas remitidas por universitarios.

¿Quién tenía razón, por fin, Marilyn y la urraca, o Perseo y millares de otras personas? Antes de tratar yo de establecer una solución de una vez por todas (no sin cierta inquietud, presumiendo justamente un chaparrón de correo similar al que casi anegó a Marilyn), volvamos a nuestros experimentos estadísticos. Se podría estimar que 20 ensayos no son suficientes para demostrar el resultado. Probemos, pues, con un ensayo más sustancial. Voy a dar a conocer mis resultados; dude el lector si gusta de su veracidad, pero si se decide a redactar su propia simulación, siga cuidadosamente el orden de acontecimientos prescrito. Al introducir atajos, es muy posible que se pierda el quid de la cuestión.

Ensayé el problema en un ordenador, efectuando 100.000 pruebas. La estrategia de Perseo resultó ganadora en 33.498 ocasiones y perdedora en 66.502; idénticos resultados, pues, aunque en orden inverso, para la urraca. Las probabilidades correspondientes, a saber, 0,33498 y 0,66502, se aproximan lo suficientemente a los valores 1/3 y 2/3 previstos por la pega como para imponer el dictamen:

Podemos afirmar de forma concluyente que Marilyn y la urraca tienen razón; las verdades matemáticas no son consecuencia del voto democrático.

¿Escéptico todavía? Marilyn propuso un argumento final que tal vez pueda convencerle. Supongamos que haya un millón de cavernas, una de ellas ocupada por Andrómeda. Perseo elige la número 1. La urraca señala entonces una de las 999.998 restantes, que contienen una gorgona cada una. Recordemos que la urraca sabe dónde se encuentra Andrómeda y que no puede, pues, elegir esa caverna. Tras numerosos ensayos, observamos que la urraca elude cuidadosamente la caverna número 777.777. ¿Qué juzga usted más verosímil, que Perseo haya elegido la cueva acertada (una probabilidad en un millón) o que la elegida no sea la correcta y que el comportamiento de la urraca nos dará una indicación mucho más fiable? Si no cree usted ni en las demostraciones, ni en las experiencias, ni en las analogías, ni en los ejemplos *a contrario*, ¿cómo podremos convencerle?

Se trata de un problema entretenido, ¿no es verdad? La dificultad proviene de lo que se denomina en matemáticas "probabilidad condicionada", esto es, la probabilidad de que se produzca un cierto acontecimiento sabiendo que ya se ha producido otro. En el caso de las probabilidades condicionadas, la intuición no es buena consejera; aquí, lo importante es que la caverna elegida

PERSEO NO MODIFICA NUNCA SU ELECCION

CAVERNA 1	CAVERNA 2	CAVERNA 3	
ANDROMEDA	GORGONA	GORGONA	GANA
GORGONA	ANDROMEDA	GORGONA	PIERDE
GORGONA	GORGONA	ANDROMEDA	PIERDE

PERSEO MODIFICA SIEMPRE SU ELECCION

CAVERNA 1	CAVERNA 2	CAVERNA 3	
ANDROMEDA	GORGONA	GORGONA	PIERDE
GORGONA	ANDROMEDA	GORGONA	GANA
GORGONA	GORGONA	ANDROMEDA	GANA

3. La estrategia en la que Perseo modifica siempre su primera elección es óptima.

por la urraca depende de la elección de Perseo. Si Perseo empezó por acertar, la urraca puede elegir entre las otras dos cavernas, pero si Perseo se equivocó (lo que es dos veces más probable), no le queda a la pega más que una sola "opción".

El argumento según el cual, restando aún dos cavernas, Andrómeda tiene iguales probabilidades de hallarse en una como en la otra sería correcto de ser la urraca la primera en elegir; es falso si su elección depende de lo que Perseo haya elegido ya. En este ejemplo, el orden de las elecciones es crucial, lo que es moneda corriente en los casos de probabilidades condicionadas.

La verdad es que, correctamente examinado, el problema es muy sencillo. La urraca no sólo tiene la estrategia idónea, sino que también su razonamiento es correcto. Repasémoslo una vez más, muy despacito.

¿Admitiremos sin reparos que por ser Perseo quien empieza seleccionando una caverna su probabilidad de acertar es de 1/3?

Así lo espero, porque constituye una de las hipótesis del problema (la urraca nos había informado de que las cavernas eran equiprobables). Supongamos que Perseo se atiene a la estrategia de "sostenella y no enmendalla". En consecuencia, no puede modificar esta probabilidad, puesto que no hace nada. Podría perfectamente taponarse los oídos con cera y no escuchar los cantos de sirena de la urraca; ello no comportaría la más mínima diferencia.

Por tanto, la idea de que sus probabilidades son mitad y mitad es definitivamente incorrecta. Y con un millón de cavernas, una estrategia de "elección mantenida" sólo le da una ocasión en un millón de tener razón. ¿Admite usted que, si Perseo está equivocado y si la urraca reduce las probabilidades restantes siempre a una misma otra caverna, entonces Perseo tendría motivos para cambiar su elección?

Lo mismo que antes, así lo espero. Desde luego, Andrómeda tiene que estar en alguna parte. No se encuentra en ninguna caverna que la urraca designe y, si Perseo se equivoca, tampoco se encuentra en la que éste ha elegido. En este caso, cada vez que la estrategia de "sostenella" lleva a una caverna errónea, la estrategia de "enmendalla" habría de conducir a la acertada. Resulta así porque la probabilidad de que la estrategia "elección modificada" sea ganadora es 1 – 1/3 = 2/3. Con un millón de cuevas, la probabilidad de que la estrategia de la urraca sea ganadora es de 0,999999.

A veces resulta interesante decir las cosas con otras palabras. La urraca le facilita a Perseo una información útil, pues le indica una caverna en la que no se halla Andrómeda. Perseo debe utilizar esta información para mejorar sus probabilidades: la información sirve precisamente para eso. Ahora bien, si mantiene su elección primera, está despreciándola, pues la elección se hizo antes de que la información fuese accesible. Ello no demuestra que deba necesariamente cambiar su elección, pero sí implica que la estrategia "mantener siempre la elección primera" no puede ser la mejor.

Y si todavía no cree lo que digo, búsquese un ayudante, haga que un terrón de azúcar haga el papel de Andrómeda y que otras tantas tazas hagan de cavernas. Aplique una estrategia 100 veces seguidas; adopte después la otra. Para compararlas, pidamos a nuestro amigo que nos revele una taza vacía *antes* de que usted haga la elección. Al actuar así sus probabilidades serán del cincuenta por ciento.

"Cuando la realidad hace tan violento impacto contra la intuición", prosigue Marilyn, "la gente queda desconcertada". Lo más terrible es que el problema no es nada nuevo: encontramos un problema equivalente en el *Calcul des probabilités* de J. Bertrand, publicado en 1889. Es conocido por "paradoja de la caja de Bertrand".

Lo cual me hace pensar otro asunto: si en la formación de los matemáticos profesionales se incluyese un curso de las llamadas "matemáticas recreativas" quizás se pudiera evitar que algunos fuesen tan lamentablemente solemnes al tiempo que tan torpes al razonar.

Ahora que sabemos que Perseo puede real y verdaderamente mejorar sus oportunidades valiéndose de la información discretamente facilitada por la leal pega, no resulta ocioso preguntarse si no existirá una estrategia mejor todavía. Supongamos, por ejemplo, que la probabilidad de que modifique su elección sea p. ¿Puede ello mejorar su esperanza de éxito?

Solución

La estrategia de cambio aleatorio de elección con frecuencia p tiene una probabilidad de éxito igual a $2p/3 + (1-p)/3 = 1/3 + p/3$, que es máxima para $p = 1$, con lo que la estrategia de la urraca no puede ser mejorada de esta suerte. La estrategia óptima consiste en "Cambie de elección cuando ésta sea mala", cuya probabilidad de éxito es igual a 1, pero que parece imposible de llevar a la práctica sin los servicios de un oráculo. La teoría de la probabilidad y la teoría de la información convergen, y la estrategia de la urraca es la mejor de las estrategias accesibles.

Libros

Sinergética, metalurgia, orígenes, Aristóteles, ecosistemas y fisiología

David Jou, Pere Molera, Luis Alonso, Joandomènec Ros y Francisco Gil

SYNERGETIC COMPUTERS AND COGNITION, por H. Haken. Springer-Verlag; Berlín, 1991.

Hermann Haken empezó a impulsar desde mediados de la década de los setenta la *sinergética*, o ciencia de la autoorganización lejos del equilibrio. De hecho, este campo gozaba ya de un amplio interés, gracias al trabajo de grupos como el de Prigogine, que intentó ofrecer una visión unificadora de estos procesos desde el punto de vista de la termodinámica, auspiciando el paradigma de las llamadas *estructuras disipativas*.

El comportamiento autoorganizativo parece ligado a las ecuaciones dinámicas de los respectivos sistemas más que a principios termodinámicos de carácter general. Por eso, Haken intentó hallar algún principio unificador examinando lo que pudieran tener en común tales ecuaciones y formuló un "principio" (en realidad, una simple comprobación analógica) según el cual, suficientemente lejos del equilibrio, uno de los posibles modos del sistema "esclaviza" a los otros.

Las redes neuronales consisten en un conjunto de elementos ("neuronas"), de naturalezas físicas muy diversas, muy interconectadas. Estos elementos suman los estímulos de entrada: si el total supera cierto umbral, disparan a su vez una señal hacia las "neuronas" conectadas con ellas. Las conexiones o 'sinapsis' entre las neuronas desempeñan un papel crucial: puede tratarse de sinapsis inhibidoras o excitadoras, y es la distribución de las características de las diversas sinapsis del sistema la que permitirá almacenar en éste ciertos "patrones" o "recuerdos". Cada patrón queda memorizado en el conjunto de todas las sinapsis.

Cuando se presenta a la red neuronal un estímulo, por ejemplo, un fragmento de alguno de los patrones almacenados, o una suma ponderada de ellos, la dinámica de la red conduce a uno de los patrones almacenados (el más "parecido" al estímulo presentado). La red neuronal posee así una "memoria asociativa" (es capaz, cuando se le presenta una información parcial, de restaurar la información global con la que ésta se relaciona) y tiene capacidad de clasificar (atribuye a cada estímulo de entrada uno de los patrones almacenados).

Desde el punto de vista físico, los avances en teorías estadísticas de vidrios de espín han permitido progresos en las redes neuronales. Se atribuye a cada neurona un valor (por ejemplo 0 o 1), según esté o no excitada. Combinando estos valores con las intensidades de las sinapsis, se puede asociar un valor numérico (una "energía") a cada configuración de la red. Lograr que la red almacene ciertos patrones equivale a encontrar las intensidades necesarias de las diversas sinapsis, de forma que los mínimos de la energía correspondan a las configuraciones de la red asociadas con ellos. Uno de los problemas de las redes neuronales es la aparición de mínimos locales suplementarios, correspondientes a memorias espúreas, que falsean el comportamiento de la red.

Vistos estos preliminares elementales pero indispensables, podemos entrar en el libro de Haken. La novedad esencial de éste consiste en desarrollar una analogía entre la formacion espontánea de estructuras fuera del equilibrio y el reconocimiento de formas. Haken apuntó ya esta analogía en 1979, pero no la empezó a desarrollar hasta finales de los ochenta. La base de la analogía es simple. Supongamos un sistema alejado del equilibrio (un fluido viscoso calentado por debajo, por ejemplo). Si el calentamiento es suficiente, aparecerán movimientos convectivos ordenados (supongamos que se trate de rollos cilíndricos a lo largo del eje x o del eje y del recipiente que contiene el líquido). Si se impone a éste rollos oblicuos (por ejemplo, calentando localmente mediante filamentos calientes), cuando cese el estímulo externo el sistema se dirigirá (si la distancia al equilibrio es suficiente) bien a rollos en el eje x bien a rollos en el eje y, según el ángulo que los rollos iniciales superpuestos formaran con el eje x o con el eje y.

Para Haken, podría admitirse que este sistema almacena dos patrones o memorias (rollos x, rollos y) y que, al serle presentado un estímulo externo, es capaz de clasificarlo o completar la información que éste da. Por consiguiente, el reconocimiento no es más que la formación espontánea de patrones en un sistema alejado del equilibrio sometido a cierto impulso inicial.

Esta analogía conceptual puede formularse en términos matemáticos a partir de la experiencia adquirida en el estudio de las ecuaciones de los sistemas sinergéticos. Es precisamente esto lo que hace Haken. En particular, centra el libro en el problema de reconocimiento de imágenes. Los patrones almacenados son diversas caras o planos. Dichas caras se subdividen en pixeles; se representan mediante cuatro cifras binarias su respectiva gradación de gris. En definitiva, a cada imagen se le asocia un "vector" multicomponente. Llamemos $\mathbf{v}k$ (k = 1,... N) a los vectores correspondientes a cada una de las imágenes almacenadas. Supongamos que se presenta a la red una imagen $\mathbf{q}$, como por ejemplo un fragmento de alguna de las caras almacenadas, o una superposición de ellas. Se pretende hallar una dinámica que transforme el estímulo inicial $\mathbf{q}$ en alguno de los $\mathbf{v}k$ almacenados, de forma que el estado final de la red corresponda al $\mathbf{v}k$ más "próximo" al estímulo inicial. Haken propone esta dinámica en analogía con las ecuaciones dinámicas de los sistemas sinergéticos. En este punto se plantean diversas preguntas: 1) ¿en qué sentido hablamos de "distancia con respecto al equilibrio"? 2) ¿qué relación tiene esta aproximación con las redes neuronales clásicas que antes hemos descrito?

Recordemos que, en las redes neuronales clásicas, la aproximación de los patrones almacenados se interpreta como una aproximación a estados de equilibrio, en tanto que en el modelo de Haken se interpreta como una aproximación a estructuras disipativas. La distancia al equilibrio viene indicada por los "parámetros de atención", que son los coeficientes que multiplican ciertos términos de las ecuaciones dinámicas. El sistema sólo es capaz de recordar los patrones a los que corresponde un parámetro de atención positivo. Este parámetro de atención puede ser interpretado en términos de la actividad de ciertas "neuronas abuelas", o neuronas de una capa intermedia en un modelo de red neuronal de tres capas. Dichas "células abuelas" constituyen un ingrediente de ciertos modelos de actividad cerebral, lo cual permite establecer conexiones fisiológicas entre estos parámetros y dichos modelos cerebrales, en los cuales puede medirse el parámetro de atención a partir del consumo localizado de energía o de

sustancias químicas (inhibidores o excitadores) en ciertas células cerebrales.

Haken subraya que su modelo es una aproximación de arriba abajo hacia las redes neuronales, a diferencia de los modelos habituales de tales redes. En efecto, en estos últimos, el tema clave es hallar las distribuciones de intensidades sinápticas pertinentes para almacenar unas memorias dadas. Para Haken, este problema es secundario. Sus ecuaciones se pueden acometer lo mismo en un ordenador secuencial que en una red neuronal. En este último caso, las intensidades sinápticas vienen determinadas por las matrices de parámetros que aparecen en las ecuaciones macroscópicas. Haken va de lo macroscópico a lo microscópico, en tanto que los modelos usuales se dirigen directamente a lo microscópico.

Especialmente atractivos resultan los capítulos dedicados a la comparación con experimentos fisiológicos. Otros capítulos de interés se refieren a las consideraciones sobre invariancia rotacional o por escala en el reconocimiento de imágenes, o al estudio del aprendizaje o de la realización de funciones lógicas. En cambio, en muchas ocasiones resulta exageradamente prolijo el formalismo matemático, que se dedica a la exposición de ideas generales de la sinergética para lectores no introducidos en el tema. Muchas de estas ideas no son imprescindibles, y creemos que más bien suponen un obstáculo en la lectura, ya que hacen difícil reconocer cuál de esta información es directamente pertinente. Es demasiado pronto para intentar hacer un balance de lo que esta línea pueda aportar al desarrollo práctico de redes neuronales o a la comprensión de los mecanismos cerebrales, pero la propuesta es atractiva y prometedora. (D. J.)

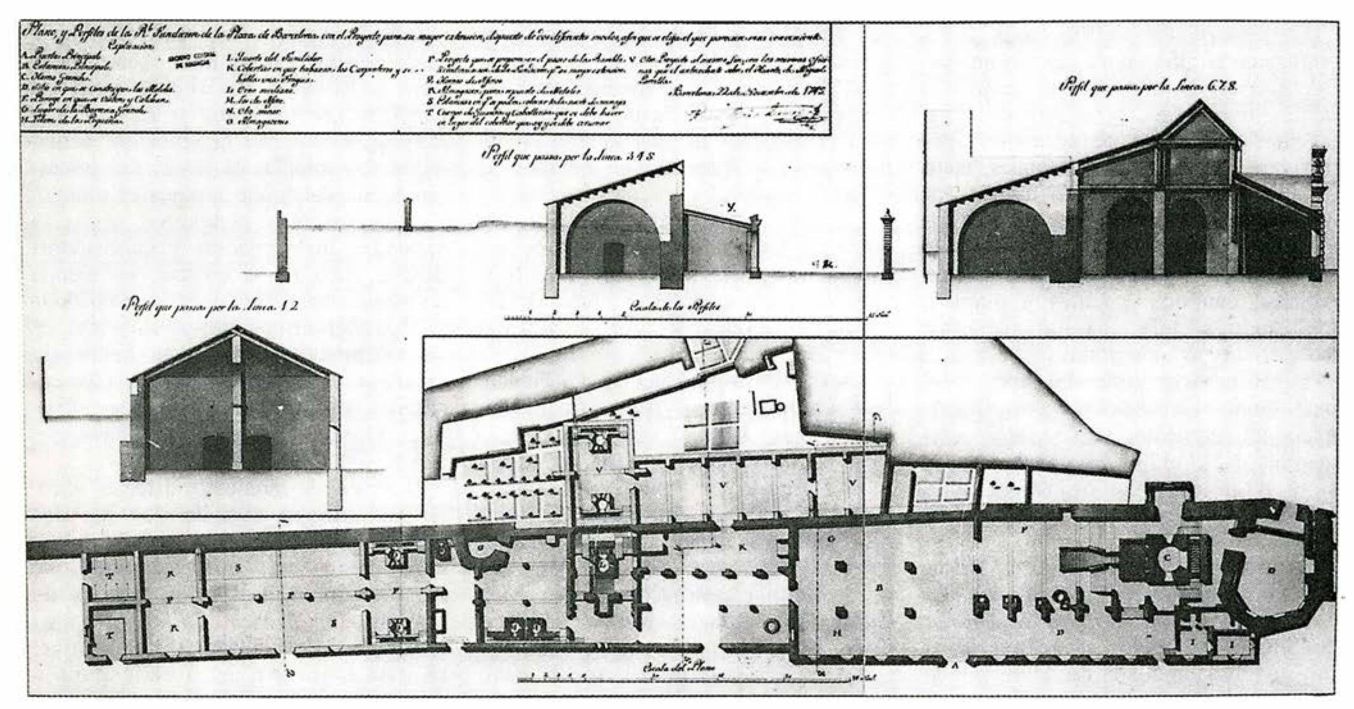
LAS REALES FUNDICIONES ESPAÑOLAS DEL SIGLO XVIII, por Aurora Rabanal Yus. Ed. Marte (Servicio de Publicaciones del Estado Mayor del Ejército); Madrid, 1990.

Las fundiciones eran industrias destinadas a la fabricación de objetos metálicos (armas, municiones, estatuas, espadas) por moldeo de la aleación líquida que se enfriaba en un recipiente que tenía la forma del "negativo" de la pieza proyectada. Estas fundiciones o funderías constaban de hornos para la fusión de la aleación, de moldes de cerámica o metálicos, que se agrupaban en el taller denominado moldería y de las secciones de mecanizado y de acabado.

El siglo XVIII representó un gran acicate para la actividad industrial. La protección de las corporaciones gremiales, la aparición de exenciones fiscales, la prohibición de entrada de productos manufacturados extranjeros, la dificultad en la exportación de materias primas, la liberalización del sistema económico... contribuyeron al auge industrial. Se crean las fábricas modernas. En un recinto localizado se reunía un proceso completo de producción y un trabajo colectivo en cadena. Recibieron el adjetivo de "reales" porque el Estado era el dueño de estas fábricas destinadas a la producción de artículos de lujo o de necesidad para el ejército. Algunas de estas fábricas pasaron luego a la iniciativa privada.

El atraso tecnológico del sector se intentó superar a través de la captación de técnicos extranjeros, y se dotó a las fundiciones de mano de obra especializada; también se enviaron estudiosos españoles a Europa, organizándose, además, la enseñanza y la investigación científica y técnica: Reales Academias de Matemáticas, creadas para la formación de ingenieros militares y artilleros, el Laboratorio Químico de Segovia, el Gabinete de Máquinas del Buen Retiro o las Sociedades Económicas de Amigos del País. El resultado fue la introducción en nuestro país de nuevas técnicas capaces de mejorar los procedimientos de fabricación, tanto en los establecimientos privados como en las manufacturas reales, consiguiéndose nuevas aleaciones, como el latón o la hojalata, y modernos procedimientos para la obtención de diferentes metales.

Las Reales Fundiciones erigidas a lo largo del siglo XVIII en España fueron construidas por miembros de los Reales Cuerpos de Artillería e Ingenieros Militares, con una importante intervención de personalidades extranjeras en la concepción de sus proyectos. La Real Fundición de Artillería de Bronce de Sevilla fue comenzada por Jorge Própero Verbom, ingeniero flamenco, fundador y director del Real Cuerpo de Ingenieros Militares; a partir de 1767 quedó el establecimiento en manos de Jean Maritz, destacado personaje de la industria militar estatal francesa, de origen suizo. Las obras del



1. Juan Martín Zermeño: Planta y secciones de la Real Fundición de Artillería de Bronce de Barcelona, con el nuevo proyecto propuesto para su ampliación, 1749 (A.G.S., M.P.D., VIII-116)

establecimiento de Barcelona estuvieron en manos de ingenieros militares, como Juan Rafael Silby y Jean Maritz, autor, además, del proyecto para la Real Fábrica de Municiones de San Sebastián de la Muga. El palermitano Francisco Sabatini, que llegó a ocupar la dirección del ramo de arquitectura civil del Real Cuerpo de Ingenieros Militares, se ocupó del proyecto de la Real Fábrica de Espadas de Toledo, dejando el desarrollo de las obras bajo la inspección del ingeniero militar de origen flamenco, Antonio Guilleman.

Al conde de Rostaing, coronel del Real Cuerpo de Artillería de Francia, se debió el proyecto de la Real Fábrica de Municiones de Eugui, cuyo planteamiento, en líneas generales, se repitió en el establecimiento de Orbaiceta, de cuya idea fue autor el irlandés conde de Lacy, inspector del Real Cuerpo de Artillería de España. El austríaco Graubner proyectó las Reales Fábricas de Latón, Cobre y Cinc de San Juan de Alcaraz, siendo el ingeniero militar, de origen francés, Carlos Lemanur, el autor del trazado de la red hidráulica que condicionaba todas las instalaciones del establecimiento.

Una vez subrayada esa intervención extranjera, el libro destaca la colaboración, en el desarrollo, dirección y ampliación de las obras, de los miembros de los Reales Cuerpos de Ingenieros Militares y de Artillería de España, profesionales idóneos para estas tareas, al ser poseedores de una formación científica adecuada, no solamente a la complejidad arquitectónica de los edificios, sino también al funcionamiento de ellos y a la dirección de las operaciones del proceso de producción.

La importancia de sus actividades constructivas transcendió el campo específico de la arquitectura industrial haciéndose cargo, principalmente los ingenieros militares, de un enorme número de obras reales, o estatales, tanto de arquitectura civil, como militar, encontrándose especialmente vinculados a las relacionadas con el desarrollo de una política económica, como fueron canales, caminos, puentes y puertos, realizando además una importantísima labor en tierras americanas.

En la primera parte del libro, después de un global apunte socioeconómico del momento, se describe la situación del moldeo de metales en el siglo XVIII: desde el bronce al latón pasando por aleaciones de hierro y de estaño.

La segunda parte del libro es un estudio monográfico de los edificios. La Real Fundición de Artillería de Bronce de Sevilla (1720-96) se estableció al sureste de la ciudad. La facilidad de comunicaciones por vía fluvial y la proximidad al puerto de Cádiz, por donde llegaba el cobre de Indias, y había de embarcar la artillería para América, debieron de influir en su localización.

En Barcelona, en las inmediaciones de la muralla de la Rambla, se situó el primer establecimiento de la Real Fundición de Artillería de Bronce de Barcelona (1733-83). Pero en la segunda mitad de siglo, la Real Fundición se trasladó al antiguo edificio de las Atarazanas, al sureste de la ciudad, que, debidamente fortificado, y al exterior del núcleo medieval, dominaba el puerto. La anterior fundición de astillero se transformó en la artesanal de artillería y fundición de cañones de bronce.

En Toledo se ubicó el establecimiento de la fabricación de espadas. Se componía de "cinco fraguas con sus obradores en ellas, y otros separados, un templador, parajes de ruedas de amolar, almacenes, y habitación cómoda para el que haya de ser Director de la fábrica, y para los dos principales maestros de ella que han de ser como examinadores".

La Real Fábrica de Municiones de San Sebastián de la Muga se estableció en Sant Llorenç de la Muga (Gerona) en 1766, porque un particular, Pedro Grau Balló, comunicó a la Junta de Comercio haber descubierto un lugar "tan abundante y primoroso en mineral de hierro, que podía proveer la maniobra de muchas fraguas y martinetes". Se estableció allí una Fundición Real de hierro colado para bombas, balas, granadas y otros usos de artillería, gracias a la excelente calidad del mineral, más ventajoso que el procedente del reino de Francia.

El yacimiento de calamina de Calar del Mundo se descubrió a mediados del siglo XVIII. Después de dos tentativas de explotación, Graubner, tras reconocer el lugar, presentó un proyecto para la erección de una fábrica de latón, que fue aprobado en octubre de 1772.

La tercera parte de este libro se destina a los artilleros e ingenieros militares que intervienen en la realización de los proyectos y obras de las reales fundiciones. (P. M.)

ORIGINS. Dirigido por A. C. Fabian. Cambridge University Press; Cambridge, 1988. **NUESTROS ORIGENES: EL UNIVERSO, LA VIDA, EL HOMBRE.** Dirigido por Antonio Fernández-Rañada. Fundación Principado de Asturias-Fundación Ramón Areces; Madrid, 1991. **ORIGINS. THE LIVES AND WORLDS OF MODERN COSMOLOGISTS**, por Alan Lightman y Roberta Brawer. Harvard University Press; Cambridge, 1990.

No es la cuestión del origen mero tormento existencialista de un ser desasistido de todo apoyo y toda esperanza. Tampoco hace falta remontarse a los relatos primeros de las grandes religiones, ni a teogonías y cosmogonías feraces de oriente y occidente; ni siquiera los filósofos a Kant o los biólogos a Darwin. Vengamos más acá en el tiempo. ¿En qué biblioteca de cuarentón inquieto falta *The Origins of Life*, de Cyril Ponnamperuma, o el *Origen de la vida*, de A. I. Oparin, en cualquier versión, menos la original rusa obviamente? La cascada de libros que, incesante, pretende responder a las preguntas fundamentales del hombre, y por ende, de la ciencia, ha afinado su caudal en la tríada que presentamos.

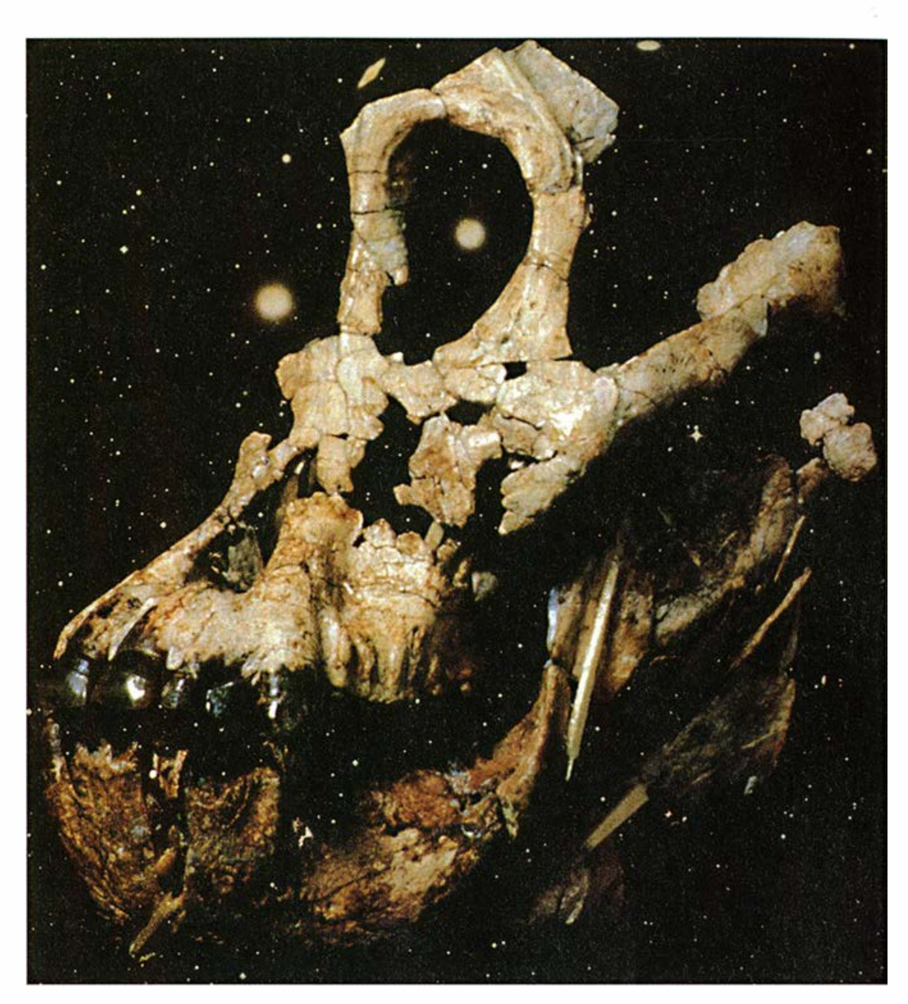
El primero, *Origins. The Darwin College Lectures*, reúne las conferencias dictadas en ese centro de Cambridge sobre el origen del universo (Martin J. Rees), del sistema solar (David W. Hughes), de la complejidad (Ilya Prigogine), del hombre (David Pilbeam), del comportamiento social (John Maynard Smith), de la sociedad (Ernest Gellner) y el lenguaje (John Lyons). Es el segundo, *Nuestros orígenes: el universo, la vida, el hombre*, una gavilla de lecciones magistrales en homenaje a Severo Ochoa. Se articula en una doble presentación (sobre libertad y verdad, de Camilo J. Cela, y la obra científica del homenajeado, de Francisco Grande Covián, compañero de los primeros años de Ochoa) y tres partes: origen del universo (Guido Münch, Antonio F. Rañada, Francisco Sánchez y José A. Martínez-Alvarez), origen de la vida (Juan Oró, Julio R. Villanueva, Margarita Salas, H. Yamada, T. Omata-Yamada y Peter Lengyel, Arthur Kornberg, Efraim Racker y Santiago Grisolía) y origen del hombre (Emiliano Aguirre, José Luis Pinillos y Pedro Laín). Por último, Alan Lightman y Roberta Brawer revisan, en *Origins. The lives and worlds of modern cosmologists*, la situación actual de la cosmología, es decir, del principio fontal de donde arranca el mundo, los organismos y el hombre, según lo entienden los creadores y cultivadores de esa rama de la ciencia, un elenco de veintisiete astrofísicos, matemáticos y físicos teóricos cuyos nombres, y sus doctrinas, aparecen con frecuencia familiar en *Investigación y Ciencia* (Hoyle, Vaucouleurs, Silk, Rees, Peebles, Gunn, Misner, Guth, Hawking, Linde, Schramm, etcétera).

Dejemos de momento el tercer libro. Se advierte en seguida que los dos primeros tienen muchos puntos en común. Pero, más que solaparse, se complementan. Entre los autores de *Origins. The Darwin College Lectures* predominan los creadores de doctrina, en tanto que en la obra española abundan los expositores, buenos expositores. La visión general que da Martin, desde la constitución del Sol y

nuestra galaxia hasta los instantes iniciales de la gran explosión, se desarrolla pormenorizadamente en la triple colaboración hispana, que se ha repartido el trabajo: Münch se ocupa de las observaciones y los resultados empíricos (parámetros, capacidad y tipos de telescopios, macroestructuras), Rañada diserta sobre los fundamentos y valoración de los modelos cosmológicos (leyes que rigen allí donde se funden cosmología y física de partículas) y Sánchez se ha reservado un capítulo crucial, el del origen de los elementos químicos y su evolución. La razón, y la necesidad, de leer ambos enfoques, el de Rees y el triple de aquí, no es otra que la profundización, sin hiperespecialismo, que brindan. Por citar dos ejemplos: Rañada aclara en el contexto general de la construcción de modelos qué entender por inestabilidad del vacío de Prigogine que produjo la transición creadora de materia, cuestión a la que aboca éste en su discurso sobre la complejidad; Sánchez detalla *per longum et latum*, a través del estudio de la concentración o abundancia de los elementos y los procesos de nucleosíntesis, por qué somos los humanos "polvo de estrellas", conclusión a la que ha llegado Rees, aunque apenas puede detenerse en ella ("We are literally made of the ashes of long-dead stars").

La irreversibilidad y complejidad es un fenómeno que no sólo se da en el universo, sino también en la propia vida. Con el añadido en ésta de una carga informativa especial. El artículo de Prigogine, que cierra los dos dedicados al cosmos y al sistema solar en *Origins. The Darwin College*, facilita la comprensión de la termodinámica del origen de las primeras moléculas orgánicas. Aquí la aportación del volumen español es dispar y no estrictamente ceñida al tema, salvo los artículos de Oró (en particular las páginas sobre síntesis de biomonómeros, biopolímeros, replicación y asociación) y Salas (iniciación y replicación del ADN). La colaboración de Kornberg es un resumen de su autobiografía *For the Love of Enzymes*, de la que se han tomado párrafos enteros y a la que debe acudir el lector para entender el juego de palabras equívoco de "ácido orótico" y el fracaso de cierto seminario (pág. 278-279 en *Nuestros orígenes*, pág. 298 en *For the Love of Enzymes*).

David Pilbeam en *Origins* y Emiliano Aguirre en *Nuestros orígenes* han seguido el mismo planteamiento general. Parten del nacimiento de la familia de los Homínidos, siguen con el origen del género *Homo* y terminan en la rama de *Homo sapiens*. Ambos son maestros en este tipo de síntesis; recuérdese *The Evolution of Man*, que



2. Cráneo de Sivapithecus

publicó el primero hace ya más de veinte años, o la presentación del segundo al libro *Paleontología humana*, editado recientemente por Prensa Científica. Pilbeam sirve aquí de introducción a Aguirre: da los rasgos generales de las distintas fases de hominización que dan carne al hueso enteco de datos y esquemas, de reexámenes de cráneos, de nociones cladísticas y paleoclimáticas, de episodios geomorfológicos, con que respalda sus troqueladas afirmaciones el hispano.

Maynard Smith apuntala matemática y biológicamente la condición social del hombre, desarrollada por Gellner, cuya colaboración, más la de Lyons, Pinillos y Laín, nos llevan al mundo de las ciencias blandas, no por el contenido de la cuestión abordada, paradójicamente lo característico humano, sino por la carencia de soporte empírico-cuantitativo que le es consustancial. Se percibe ese otro terreno desde los primeros párrafos sobre disquisiciones lingüísticas (¿qué entender por sociedad?, ¿origen u orígenes del lenguaje?, ¿a qué llamar mente? O la confesión de Laín: "Nadie podrá comprobar si mi hipótesis es acertada o errónea"). Pero será difícil que el lector encuentre los términos del problema expuestos con mayor claridad, ni mayor fidelidad en los dos últimos a la teoría zubiriana de la interdependencia cuerpo-mente.

Origins. The lives and worlds of modern cosmologists penetra en el transfondo personal de quienes han configurado el saber estándar del nacimiento del universo y su evolución. Como diría Rees, sólo pueden explicar lo que las cosas han sido desde el momento inicial, pero no el origen de ese instante inicial. O bien negar ese fogonazo originario, esa singularidad. Detrás de cada opción teórica, de cada modelo, hay una historia individual de aficiones y lecturas, que aflora en este libro de entrevistas hilvanadas en torno a tres apartados: trabajos realizados e historia académica, postura ante las distintas hipótesis cosmológicas y opciones filosóficas sobre el origen del mundo y su sentido.

Para moverse con soltura entre las preguntas y respuestas, se agrega una larga introducción sobre la situación actual de la cosmología desde la incorporación de la teoría de la relatividad general y el descubrimiento de la expansión del universo hasta el controvertido principio antrópico, pasando por los distintos modelos, los medios

de comprobación, la formación de las estructuras y la materia obscura o la convergencia de cosmología y física teórica. Introducción que se completa con un extenso glosario final de términos empleados en las conversaciones. Además, al hilo de éstas, los entrevistadores ponen en su debido contexto las declaraciones de los cosmólogos.

Precede a cada entrevista un breve resumen biográfico. El primer contacto con el mundo de la astronomía llegó a muchos en la infancia o en la juventud con la lectura de las obras divulgadoras de Hoyle o Sciama, aunque son bastantes los de vocación tardía. El diálogo se enhebra de acuerdo con la aportación de cada cosmólogo y su evolución particular. A propósito de Hoyle, por ejemplo, se nos recrea el ambiente donde nació el modelo de estado estacionario (la generación continua de materia, sin principio ni fin, por la que vemos siempre la misma en todos los lugares), hipótesis abandonada por la mayoría en favor de la teoría de la gran explosión cuando se descubrió la incompatibilidad de aquélla con la distribución espacial de los cuásares.

Varios conceptos fundamentales de la teoría cosmológica reclaman la opinión de todos. En particular: el problema del horizonte, planteado en 1969 por Misner, y que inquiere por qué razón el universo parece mucho más uniforme de lo que cabe inferir del intercambio de calor y homogenización subsiguiente al nacimiento del cosmos; el problema de la planaridad, es decir, por qué el universo se halla hoy tan próximo al límite entre un cosmos abierto y un cosmos cerrado; y el modelo inflacionario de Guth, modificación reciente de la teoría de la gran explosión, según el cual el universo conoció en su infancia un período brevísimo de expansión exponencial para decaer luego en una velocidad mucho más lenta. Quedan abiertos muchos problemas, cuya importancia varía con el campo de interés del interlocutor (para unos, la escala temporal y la escala de distancias del universo; para otros, acotar las condiciones iniciales y explicar las fluctuaciones; para éste mejorar las medidas de las anisotropías de la radiación cósmica de fondo; para la mayoría, la formación de galaxias y de estructuras en general).

La belleza del modelo continúa siendo una razón poderosa para su aceptación. Belleza que tiene que ver con su elegancia matemática, pero también con su visualización. Quien más quien menos confiesa trabajar con su boceto perfilado. La última cuestión, más allá de la física, es la relativa a la finalidad del universo; las respuestas tienen que ver con el esquema de valores de cada uno, porque la física en cuanto tal, admite la mayoría, no puede pronunciarse sobre ello. Sobre todo, cuando en astrofísica, contesta Silk, estamos muy lejos de saber de dónde viene todo y hacia dónde va. (L. A.)

ARISTOTLE TRANSFORMED. THE ANCIENT COMMENTATORS AND THEIR INFLUENCE. Dirigido por Richard Sorabji. Duckworth; Londres, 1990. **NICOLAUS DAMASCENUS DE PLANTIS.** Edición preparada por H.J. Drossaart Lulofs y E.L.J. Poortman. North-Hol-land Publishing Company. Amsterdam, 1989. **TWO GREEK ARISTOTELIAN COMMENTATORS ON THE INTELLECT.** Traducción e introducciones de Frederic M. Schroeder y Robert B. Todd. Pontifical Institute of Mediaeval Studies; Toronto, 1990.

Aristóteles está hoy en los manuales de historia de la ciencia y ocupa amplio espacio en los de historia de la filosofía. Pero no es el Aristóteles que dominó, más de mil años, el pensamiento de Occidente y Oriente próximo. A ese Aristóteles transformado (léase traducido, abreviado, comentado, expurgado, interpolado, criticado) podemos acercarnos ya con solvencia gracias a los dos primeros volúmenes de la reseña. El tercero constituye una extensión de la obra dirigida por Sorabji, la que afecta a los dos "aristotélicos puros" del helenismo: Alejandro de Afrodisias y Temistio.

Aristotle transformed es, con mucho, un empeño de Sorabji, autor de varias obras sobre la física aristotélica, según se explicó en las escuelas de Atenas y Alejandría, y director de una colección sobre comentaristas del estagirita que publica Duckworth con la Cornell University Press. Agrupa aquí la primera visión panorámica de esos científicos y filósofos, reputados, por desconocidos, menores. Con acertado criterio repesca artículos clásicos, sujetos a revisión si procede, y colaboraciones inéditas. Por ellos se enterará el lector del alcance de la influencia de neoplatónicos y neoaristotélicos en el Islam primero, en la Europa medieval, luego, y el Renacimiento finalmente.

La restauración aristotélica, tras la dilución del Liceo en escuelas menores, cobra especial fuerza en el siglo primero antes de Cristo, con Andrónico de Rodas, quien compiló el corpus y comentó algunas obras. La escuela alcanza su cenit en las postrimerías de la segunda centuria de nuestra era con Alejandro de Afrodisias. Fuera de ese círculo fiel siguen interesando las *Categorías*, tratado de lógica donde reciben especial atención las funciones gramaticales, la enunciación y los modos de ser, y que ha servido de catalizador o punto de convergencia de la escuela estoica, la platónica y, por supuesto, la aristotélica.

No menos fuerte, en realidad más, es la escuela neoplatónica que encabeza Plotino (primera mitad del siglo III), cuyas *Enéadas* son en buena parte antiaristotélicas; si bien su discípulo Porfirio lanza ya un puente al defender el esquema de categorías (sustancia, cualidad, cantidad, relación, etcétera) de Aristóteles. Y esta postura contemporizadora será, sin duda, la dominante lo mismo en Atenas que en Alejandría, los dos centros principales donde se agrupan los científicos filósofos aquí estudiados. A Porfirio se le atribuye, en efecto, el escrito *Sobre el carácter unitario de la escuela de Platón y la de Aristóteles*.

Cierto es que esa unidad parece a veces buscada con violencia, como en Iámblico (de la escuela siria, que vivió entre el 240 y el 325), para quien Aristóteles no contradecía la teoría de las ideas de Platón, o en Hierocles de Alejandría (siglo V), defensor de esa armonía a propósito de la creación del mundo. Algunos incluso van más lejos en ese irenismo e introducen en la amalgama platónico-aristotélica la doctrina pitagórica.

En un orden complementario, las enseñanzas se van ahormando para constituir un programa de estudio regular: cursos introductorios (las *Isagogé*) y niveles de dificultad creciente, que vienen a ser en muchos casos glosas sobre un texto fundamental de cualquiera de los dos maestros máximos (*Fedón*, *Timeo*, *De anima*). Otro punto de inflexión importante es la aparición de una filosofía cristiana que, en el tema debatido de la creación y eternidad del mundo, obligará a distanciarse de Aristóteles a los, en otras cuestiones, aristotélicos convencidos (Filopón), o a tornarse neoplatónicos (san Agustín), no obstante sus discrepancias con Porfirio. Era de presumir, por fin, que en ese intercambio y reflujo de préstamos que advertimos en los comentaristas se perdiera el pensamiento genuino de los fundadores de la Academia y del Liceo, y resultara un Aristóteles platonizante o un Platón hilemórfico.

Aunque tradicionalmente suele dividirse ese período que transcurre desde el siglo primero antes de Cristo hasta la alta Edad Media en distintas escuelas neoplatónicas (de Roma, Alejandría, Atenas, Siria, Pérgamo), no es descabellado el agrupamiento tripartito de los comentaristas que esboza Sorabji: aristotélicos de la segunda y tercera centuria de nuestra era con una tardía ramificación en Temistio (317-388), neoplatónicos que escribieron desde mediados del siglo III hasta el 610 (llamada de Esteban de Alejandría a Constantinopla) y repunte de comentaristas en la corte bizantina (Miguel de Efeso).

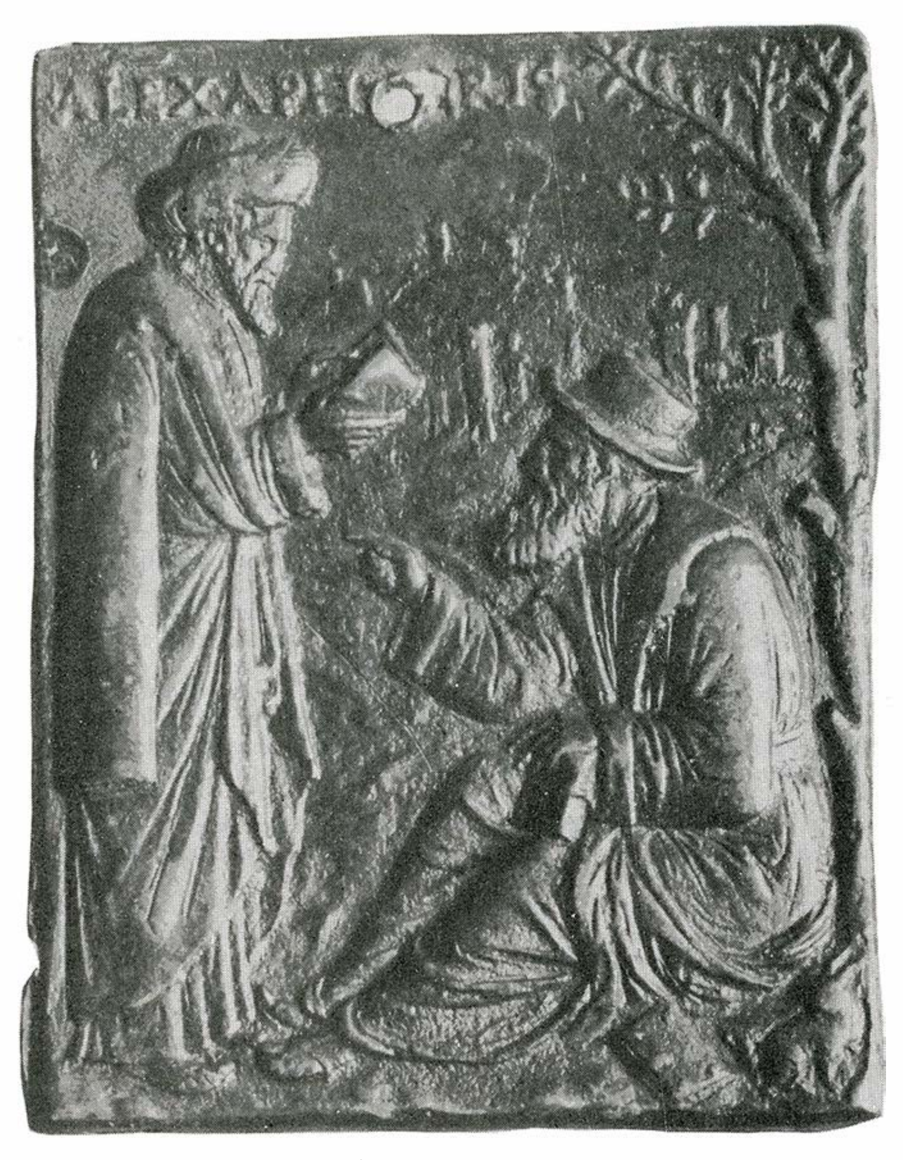
La veintena de estudios que componen la obra atienden preferentemente a los autores que abren nuevas vías (Alejandro, Plotino, Porfirio, Siriano, Simplicio, Filopón, Boecio), a los problemas fontales (corpus de comentarios aristotélicos, estructura del comentario, doctrinas —lógica, física, psicología, ética, teología—, armonización de teorías) y transmisión de ese saber a Occidente a través de los árabes.

Por incomprensible que le parezca al lector, la biología de Aristóteles se ha venido enseñando de forma incompleta desde el Renacimiento. Y constituye todavía un capítulo borroso el de su influencia hasta la Edad Media. Los clásicos (W. D. Ross, W. Jaeger o el mismo G.E.R. Lloyd) no pasan más allá de afirmar que el *De plantis* es una obra de Nicolás Damasceno, que vivió en la época de Augusto, apuntalando así el reparto tradicional de papeles: Aristóteles sería zoólogo y su albaceas Teofrasto, botánico. Desde la publicación del libro de Drossaart Lulofs y Poortman, *Nicolaus Damascenus De plantis. Five Translations*, las cosas habrán de cambiar de raíz. ¿Por qué?

El *De plantis* de Nicolás, es la tesis del libro, constituye un compendio de las obras de Teofrasto (*Historia plantarum, De causis plantarum*) y la obra perdida de Aristóteles (*De plantis*), a la que éste se refiere en varias ocasiones a lo largo de sus escritos. Por consiguiente, los párrafos que no encontremos en el discípulo deberán verosímilmente ser del maestro, si mantienen coherencia con el pensamiento biológico de Aristóteles.

No es fácil, sin embargo, depurar hasta qué punto son aristotélicas las enseñanzas complementarias de la botánica de Teofrasto. Empresa que se complica con la historia vivida por el *De plantis* del damasceno. En primer lugar, ésta se ha perdido. Escrita en griego, se tradujo al siriaco; pero esa versión se ha perdido también, salvo una copia mutilada del 1400 que se conserva en Cambridge. El manuscrito siriaco se tradujo, a su vez, al hebreo y al árabe. Del árabe (principios del siglo X) se vertió al latín (comienzos del XIII), de éste al griego (comienzos del XIV); del árabe se tradujo también al hebreo; y, por último, del árabe se extractó un compendio que se vertió asimismo al hebreo.

Quizá convenga añadir en seguida que Nicolás Damasceno, olvidado muy pronto en Occidente, gozó de cierto predicamento en Oriente a través de su *Compendio de la filosofía de Aristóteles*, su *Metafísica*, sus tratados zoológicos y, por supuesto, el *De plantis*. En buena parte sólo tenemos noticia fragmentaria de los mismos, por vía indirecta o por resúmenes. Lo



3. Aristóteles y Alejandro de Afrodisias. Plancha de bronce creada por Ulocrino.

más próximo al autor es el manuscrito incompleto de Cambridge, no hay ni un cuadernillo entero, que trae la traducción siriaca de sus obras.

Drossaart se ciñe al análisis de los pormenores técnicos de las cinco traducciones principales, a cada una de las cuales consagra un capítulo con la incorporación del texto completo, pero deja para trabajos ulteriores el estudio interno de cada versión, es decir, su contenido botánico. Ha hecho lo más difícil: dedicar largos años a la depuración y filiación de los textos, para que otros puedan entrar cómodamente en su investigación.

La versión latina de Alfredo de Sareshel se realizó en España, y está pidiendo que alguien resuelva, entre otros, el problema de los arabismos y castellanismos (acelga, beleño, cáscara) que salpican dicha traducción. Y con ello, el estado de la botánica teórica en el Medievo hispano, conocido sólo a través de las obras agronómicas y farmacológicas. Por lo demás, Drossaart expone con claridad los términos de la cuestión.

Se suelen citar, como ejemplos de aristotélicos de probada fidelidad en medio de ese magma de influencias presocráticas, platónicas o teofrásteas, a Alejandro de Afrodisias y a Temistio. Constituyen el trabajo de investigación, respectivamente, de Schroeder y Todd, en el nuevo volumen de la serie sobre fuentes que edita el Instituto Pontificio de Estudios Medievales de Toronto.

Como indica el título, *Two Greek Aristotelian Commentators on the Intellect*, el campo queda delimitado a la noética. Más concretamente, al capítulo 5 del tercer libro del *De anima*, donde Aristóteles esboza su teoría del entendimiento agente, o primer paso en el proceso psicológico de la abstracción que resultará en la formación de los conceptos o las ideas. Son 16 líneas en griego en la edición de la Loeb, que hablan de por qué hay dos principios en el alma a semejanza del

dualismo que explica la materia, y siendo la función del alma racional el conocer, cómo se complementan ambos y se resuelven en uno solo en dicho acto. Sobre ese fragmento, que leído de corrido y sin perspectiva histórica parecería hoy una galimatías, se ha escrito más que en torno a cualquier otro texto filosófico. Ello subraya la importancia de la interpretación que le dan Alejandro y Temistio, supuestamente vacunados contra toda contaminación externa, y en la que se apoyaron muchísimos, por ejemplo, al-Kindi, al-Farabi, Avicena, Averroes, y así hasta la escuela de Padua.

La lectura que hace Alejandro se expresa en su opúsculo *De intellectu*, que se nos presenta traducido al inglés. El texto de Temistio que conjuntamente se ofrece es su paráfrasis de los capítulos 4-8 del último libro del *De anima* (la intelección y el intelecto en potencia, distinción de los dos intelectos, algunas operaciones del intelecto, el intelecto práctico, distinción y coordinación de las facultades del conocimiento).

Según es norma en este tipo de trabajos, la versión del texto va precedida de una introducción general en la que se exponen los datos seguros sobre la biografía de los autores y el examen crítico de la historiografía relativa al tema. La traducción se acompaña de un aparato documental exhaustivo, con anotaciones y comentarios a los textos dudosos y obscuros. Por último se inserta un vocabulario de términos griegos y sus equivalentes en la lengua moderna empleada. En la mayoría de los casos se evita el estilo ensayista, de sobreentendidos, en aras de la claridad y el rigor. Lo que a veces no se ahorra es *l'ennui de tout dire*, en particular si se trata de un trabajo de grado académico no debidamente revisado para la publicación. Venturosamente ese peligro se ha sorteado bien aquí. (L. A.)

NEOTROPICAL WILDLIFE USE AND CONSERVATION. Compilado por John G. Robinson y Kent H. Redford. The University of Chicago Press; Chicago, 1991.

Nos está llegando tanta información, veraz o espuria, sobre el desastre ecológico que supone para todo el planeta el asalto del hombre moderno a la selva tropical, en especial en América, que un libro como éste es especialmente bienvenido. A lo largo de más de quinientas páginas, cerca de medio centenar de autores, procedentes de los campos de la biología y de las ciencias sociales, aportan los resultados de sus investigaciones y ofrecen su respuesta a diversas preguntas relacionadas con el uso y la conservación de la vida salvaje en el trópico americano.

Básicamente, estas preguntas pueden formularse como sigue: ¿Qué importancia tiene la fauna salvaje para los habitantes de la zona neotropical? ¿Qué impacto supone la utilización de animales salvajes para las poblaciones humanas y para las comunidades ecológicas? El tipo actual de utilización de los recursos vivos naturales que hace el hombre, ¿es sostenible, o puede llegar a serlo? En definitiva, ¿puede la explotación de animales salvajes promover su conservación y aportar beneficios justos a las poblaciones humanas locales?

Con matices, los distintos autores dan una respuesta positiva a estas dos últimas preguntas, a condición de que la gestión y la conservación de la fauna neotropical se tomen en serio y se hagan sobre bases científicas. Se propone, básicamente, el mismo enfoque que se ha aplicado a las pesquerías y a las explotaciones naturales en general: primero conocer el recurso y su potencial, y luego explotarlo sin sobrepasar los límites a partir de los cuales la recuperación es inviable.

La treintena de capítulos se agrupan en un bloque de introducción, que plantea el marco de referencia, un bloque final, que aventura las perspectivas de futuro, y cinco bloques que clasifican las aportaciones de los expertos en Caza de subsistencia, Caza y recolección de animales destinados al comercio, Cría y explotación ganadera, Caza deportiva y Aspectos comerciales. Los estudios se centran en algunas especies, que van desde los reptiles (tortugas, caimanes, iguanas y otros lagartos) a los mamíferos (pacas, capibaras, tapires, ciervos, guanacos, vicuñas, primates), pasando por las aves (chachalacas y guanes, tórtolas, patos, loros); o bien suponen un enfoque más general, al referirse al conjunto de presas cazadas por las poblaciones indígenas o a las comunidades ecológicas enteras objeto de explotación, o de visita en los parques naturales.

Sorprende, en primer lugar, al biólogo cuyo conocimiento de los animales exóticos tratados proceda de los textos de zoología y ecología tropical y de alguna que otra visita a zoológicos y museos, la importante implicación de la fauna salvaje neotropical en la economía de los pueblos de la región. (La respuesta a la primera de las preguntas formuladas es, pues, "Mucha".) Una cosa es conocer que las poblaciones indígenas conservan en su mayoría el tipo de subsistencia propio del cazador-recolector y otra muy distinta pasar revista a las largas listas de animales que entran en su dieta.

La segunda sorpresa, aunque una ojeada a cualquier tienda de animales exóticos ya nos debiera haber prevenido, es la importancia del comercio de aves, reptiles y, en menor medida, mamíferos neotropicales que, siguiendo caminos legales o fraudulentos y después de peripecias variadas que diezman sus efectivos, alcanzan los comercios de occidente. Las cifras se disparan y pierden pronto su significado: decenas de miles de loros son exportados por México a los Estados Unidos y Europa. Las pieles de reptiles y mamíferos son otra fuente de ingresos, que llena los bolsillos de los intermediarios al tiempo que vacía las selvas de sus moradores y propicia el auge de las granjas (de caimanes, por ejemplo). La respuesta a la segunda de las preguntas planteadas es, así, doble: el impacto para las poblaciones humanas es grande, y económicamente significativo, y para los ecosistemas es enorme, y ecológicamente dañino.

La tercera sorpresa y, por primera vez, agradable, es que una explotación incruenta de los recursos naturales (por ejemplo, mediante la visita turística a parques naturales) puede ser más beneficiosa desde el punto de vista económico que la explotación cruenta de los pobladores de la selva, y es, desde luego, mucho más beneficiosa desde el punto de vista ecológico. Así se ha podido establecer en la Reserva de la Biosfera de Manú (Perú), en la que los guacamayos generan más beneficios al ser contemplados desde las embarcaciones que si fueran capturados para destinarlos al comercio de aves exóticas.

Recientemente, el interés por los ecosistemas tropicales ha trascendido de los especialistas al gran público. Entre la bibliografía situada a medio camino entre el estudio detallado y la divulgación yo destacaría *The tropical rain forest. A first encounter*, de M. Jacobs, compendio excelente de los ecosistemas tropicales terrestres de todo el planeta; *Amazonia*, (de G. T. Prance y T. E. Lovejoy), centrado en el subcontinente americano, y *A neotropical companion. An introduction to the animals, plants and ecosystems of the New World tropics*, de J. C. Kricher, que es una guía de campo de iniciación al complejo mundo de las pluviselvas americanas, con las limitaciones que ya pueden imaginarse en una guía que pretenda abarcar la inmensa variedad florística, faunística y ecosistémica del trópico.

El libro que comento se añade por propios méritos a esta lista sucinta, cuyos textos complementa en el campo de la conservación, la explotación racional de los recursos vivos y el mantenimiento de unos modos de vida que van parejos con la integridad de la selva amazónica.

Los compiladores creen que los datos y conclusiones que se ofrecen aquí constituyen "una contribución útil a la

labor de gobiernos, organismos de desarrollo, instituciones financieras internacionales, organizaciones conservacionistas, grupos defensores de los derechos de los indígenas y el público en general". Comparto por entero esta opinión, puesto que ofrece directrices útiles para la gestión, la conservación y el desarrollo de los ecosistemas neotropicales.

Una reflexión al margen, pero obligada en este año del quinientos aniversario del descubrimiento de América. Un tercio de los autores son hispanoamericanos, y los dos tercios restantes norteamericanos y europeos; entre ellos, sin embargo, ni un solo español, ni un portugués. Es una lástima que, independientemente de dónde haya que buscar el origen de la degradación de los ecosistemas tropicales americanos, la investigación que pretende conocerlos y aportar datos para su defensa y recuperación se haga sin contribución ibérica alguna. Sin duda la lejanía no es una excusa; no lo fue en su momento para los descubridores y los naturalistas, ni debería serlo ahora que los políticos se llenan la boca de colaboraciones, actividades coordinadas, investigaciones plurinacionales y trabajos cooperativos entre las excolonias y las exmetrópolis. (J. R.)

SIGNAL PERCEPTION AND TRANSDUCTION IN HIGHER PLANTS. Dirigido por R. Ranjeva y A. M. Boudet. Springer Verlag; Berlín, 1990.

Se trata de las actas del "NATO Advanced Research Workshop" que, sobre aspectos particulares del mismo tema, tuvo lugar en Toulouse en julio del 1989. Por consiguiente, quien se acerque a este volumen con la intención de encontrar en él un tratado general sobre esta materia sufrirá una primera decepción, ya que, a pesar de varias magníficas contribuciones que contiene, lo más parecido a las expectativas despertadas por su lema es el artículo final, de los profesores Ranjeva y Boudet, quienes exponen en breves líneas las definiciones y los conceptos básicos.

Por todo ello, resulta arriesgado elaborar una reseña global y unitaria, dada la diversidad de temas y enfoques, de materiales, métodos y conclusiones que se nos ofrecen, desde la primera a la última de sus páginas. En efecto, no es ni siquiera posible vertebrar, en capítulos suficientemente homogéneos, los veinticinco trabajos restantes, fruto de la colaboración de algo menos de un centenar de especialistas, la mitad de los cuales participaron activamente en el ARW.

Barbier-Brygoo y colaboradores comprueban que la sensibilidad de los protoplastos de tabaco a la auxina disminuye en presencia de anticuerpos específicos de los receptores auxínicos de membrana y que aumenta cuando se añaden proteínas receptoras específicas. Concluyen que la sensibilidad está modulada por el número de los receptores de membrana. Venis y Napier profundizan en el conocimiento del receptor auxínico de la membrana de células de maíz, a través de experiencias con anticuerpos mono y policlonales. El grupo encabezado por Hall responde a la pregunta de si el etileno es una hormona o un segundo mensajero, es decir, si tiene su propio mecanismo de acción o participa en los modos de acción de las auxinas.

Para el grupo de Meyer hay suficientes pruebas de que la proteína específica de membrana que se une a la fusicoccina es el verdadero receptor de esta fitotoxina, herramienta eficaz en las investigaciones sobre las fitohormonas. Zocchi estudia la modulación, por diferentes estímulos y modos de acción en cascada de las ATPasas de membrana involucradas en la regulación de múltiples procesos que involucran a diferentes quinasas y Ca^{2+}. En relación con este mismo tema, Scherer propone un modelo hipotético de transducción molecular de la señal, que hace intervenir las actividades fosfolipasa A_2 y C, fosfolípidos activos, Ca^{2+} citosólico, proteínquinasas y H^+-ATPasas.

Aducci aborda la obtención de receptores funcionales por reconstitución de receptores solubilizados. El equipo de Friker trata de la transducción basada en Ca^{2+} desde una perspectiva general y en sistemas específicos, como el cierre estomático inducido por ABA y la formación y fijación de la polaridad en los zigotos en desarrollo de *Fucus* y *Pelvetia.*

Scroeder aporta nuevos datos sobre la identificación de los mecanismos moleculares de transporte iónico y su regulación en las células oclusivas de los estomas, como sensores de CO_2.

Kauss *et alii* profundizan en el conocimiento de los inductores de la síntesis de callosa, polisacárido asociado con respuestas a diferentes tipos de tensiones (traumatismos, infecciones fúngicas, etcétera), en relación con la captura de Ca^{2+} externo.

Thellier *et alii* describen los métodos de visualización de los cambios locales en los contenidos iónicos de una sola célula mediante la monitorización computerizada por video-microscopía de fluorescencia. Boss *et alii* proponen que los inositolfosfolípidos actúan como fuente de segundos mensajeros y regulan las ATPasas del plasmalema. Marmé arguye que la activación del metabolismo polifosfoinositósido realiza una función significativa en la transducción de las señales en los vegetales y que gran parte de las señales interfieren con el metabolismo de los fosfoinositósidos, requiriéndose mayor investigación antes de aceptar la presencia de proteínas similares a la proteínquinasa *C* de las células animales.

Serrano y otros ponderan la validez de los sistemas transgenéticos para comprobar componentes esenciales en los procesos fisiológicos. El grupo de Sotiroudis propone que el sistema del control del metabolismo del glucógeno en los tejidos de los mamíferos es clave para la comprensión de las bases moleculares de la acción hormonal y de otras señales extracelulares.

Dixon y otros establecen una aproximación genética molecular al problema del aislamiento e identificación de proteínquinasas, mediante técnicas de clonación. Johnson sostiene que, aunque no se haya identificado el mecanismo de acción del fitocromo, nos es lícito concluir que existen respuestas al mismo con sistemas de transducción de señal mutuamente incompatibles.

Gadal *et alii* profundizan en el estudio de la modulación por la luz de enzimas cloroplásticas mediante el sistema ferredoxina-tiorredoxina, centrándose en el caso de la NADP-malato-dehidrogenasa y concluyendo que la modulación luminosa de estas enzimas es general en los tipos metabólicos C_4 y C_3 y debida a una cadena reguladora de naturaleza tiólica. Nimmo *et alii* dedican su texto al control de la fijación del CO_2 en plantas C_4 y CAM, aportando datos de la regulación, por fosforilación/defosforilación mediante las respectivas quinasas y fosforilasas, de la sensibilidad al malato de la PEPc.

Esquerré-Tugayé *et alii* se acercan a la defensa de las plantas y la atribuyen a la generación de la señal causada por la interacción planta/microorganismo, su reconocimiento, su transducción y toda una serie de reacciones en cascada que conducen a las respuestas defensivas. Dixon *et alii* tratan sobre los estímulos que determinan la activación de los genes de defensa al ataque de patógenos, en células en cultivo y las principales respuestas defensivas.

Sievers estudia el proceso del gravitropismo, su susceptición mediante estatolitos, las acciones del Ca^{2+} y la calmodulina en la transducción de la señal y sus efectos en el transporte polar de auxinas que son, en definitiva, las moléculas que determinan el crecimiento diferencial de una parte de la raíz respecto a la otra. Morré realiza un estudio comparativo entre los sistemas de transducción de señales en animales y vegetales, con sus semejanzas y diferencias. Harborne estudia los procesos de comunicación entre la planta y el medio ambiente, centrándose fundamentalmente en las señales volátiles, táctiles y visuales. (F. G.)

Apuntes

Sabido es que muchas citas que corren son apócrifas o distorsionadas porque se han sacado de contexto. Cuando se están cumpliendo los doscientos años de la creación de la fisiología animal por Lavoisier con sus trabajos sobre la respiración como proceso de combustión química, dos son las frases que corren a propósito de su muerte bajo la hoja de la guillotina. Una apócrifa, atribuida al presidente del tribunal "revolucionario" que dictó la perversa sentencia: "la República no necesita de los científicos, que sea la justicia la que tome su curso". Sí es, empero, auténtico el comentario del matemático Joseph-Louis Lagrange al enterarse de su muerte al día siguiente: "ha bastado un instante para segar su cabeza; habrán de pasar cien años antes de que nazca otra igual."

Por ese azar o golpe de suerte que acompaña tantas veces a la investigación se buscaban cuásares —los objetos más brillantes del universo— y se ha encontrado uno de los más débiles. La fuente, BRI0021-0214, había pasado inadvertida a los detectores por su parva luminosidad: 10.000 veces menos que el Sol. A tenor de su brillo, se le atribuye una temperatura de 2250 grados kelvin. Sin ser la menos luminosa, la masa de esa estrella roza los límites de lo necesario para alimentar la combustión nuclear. Por debajo de esa frontera, la estrella sería ya una enana marrón.

Contra pesticidas, ingeniería genética. Expertos en genética vegetal han creado, en un esfuerzo de colaboración internacional, la patata pilosa, que resiste el ataque de los insectos. El vello, que remata en una sustancia viscosa, no se desarrolla en el tubérculo, sino en el tallo y las hojas, que concentran la atención de los visitantes indeseables. Los insectos quedan pegados en las hojas y mueren de hambre. La nueva variedad de patata se ha conseguido cruzando una cepa silvestre no comestible y otra domesticada.

Nada es eterno en la Tierra. También las dorsales centro-oceánicas tienen su ciclo de vida. Sabemos, en efecto, que la mayor cadena montañosa y la red de volcanes más activa yacen, bajo las aguas oceánicas, en las dorsales que separan placas corticales del planeta. Existe una jerarquía de segmentación y agrietamiento que desciende desde fracturas permanentes hasta leves discontinuidades temporales. La roca fundida que emerge del sistema de las dorsales crea nuevo suelo oceánico y fomenta la formación de grietas y segmentos. Las grietas promueven, a su vez, la actividad volcánica submarina.

La teoría de la evolución subsume un conjunto de hipótesis que apuntalan su valor científico. Una de ellas es la llamada deriva de Wright, quien propuso en 1931 que una especie bien adaptada a su medio podía alcanzar un estadio mejor asentado, aun cuando hubiera de atravesar en ese proceso por una fase intermedia menos adaptada. Lo explicaba así: si tenemos varias subpoblaciones en condiciones de aislamiento parcial, las recombinaciones favorables de genes pueden resultar en una cuya potencia acabe imponiéndose en la población entera. Hoy vería satisfecho el cumplimiento de su hipótesis en *Tribolium castaneum*.

Diríase que Galatea, la pastorcilla de la novela cervantina, no está dispuesta a abandonar su tarea bucólica. Ahora en los cielos. El Voyager descubrió un complejo sistema de anillos y arcos de anillos en torno a Júpiter, amén de sacar a la luz otros seis satélites desconocidos. Los análisis de los datos del Voyager ponen de manifiesto una distorsión radial con una amplitud de unos 30 kilómetros, que viaja a través de los arcos anulares. Se le atribuye esa perturbación a Galatea, que pastorearía así a los anillos y los apriscaría en arcos.

Todo quedó en pavesas en el viaje de prueba del tren japonés de alta velocidad de levitación magnética. Preparado para correr a más de 400 km/hora sobre sus imanes superconductores, el tren ardió cuando se deslizaba lentamente sobre sus ruedas de caucho. Las paredes de cemento que protegen los raíles se convirtieron en auténtica caldera de confinamiento. No es sin embargo el fuego el único problema. ¿Cómo proteger eficazmente el interior de los coches de los intensos campos magnéticos que emanan de los imanes superconductores? ¿Cómo resolver el enfriamiento de los imanes que dejaría al tren a merced de las ruedas combustibles? Lo de menos son los 2300 millones de pesetas que se han perdido, migajas comparado con la ruina económica y política que supondría la cancelación del proyecto.